

中国石油和化工勘察设计协会团体标准

预成孔深层夯实技术标准 (征求意见稿)

**Technical Specification for Deep Compaction
inside Preformed Hole
(Draft for Discussion)**

中国石油和化工勘察设计协会团体标准

**预成孔深层夯实技术标准
(征求意见稿)**

**Technical Specification for Deep Compaction
inside Preformed Hole
(Draft for Discussion)**

主编单位：中化岩土集团股份有限公司

前 言

根据中国石油和化工勘察设计协会《关于印发 2022 年第 2 批协会团体标准制修订计划的通知》（中石化勘设协[2022]47 号）的要求，标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准主要技术内容有：1. 总则、2. 术语与符号、3. 基本规定、4. 设计、5. 施工、6. 质量控制与质量检测。

本标准由中国石油和化工勘察设计协会归口管理，由中化岩土集团股份有限公司负责具体技术内容的解释。为了提高标准的质量，请各单位在执行过程中，注意总结经验，积累资料，随时将有关意见反馈给中化岩土集团股份有限公司（北京市大兴工业开发区科苑路 13 号，邮编 102600）。

本标准主编单位：中化岩土集团股份有限公司

本标准参编单位：北京场道市政工程集团有限公司

中国石化工程建设有限公司

中国寰球工程有限公司

中国石油天然气管道局有限公司

中交水运规划设计院有限公司

化学工业第一勘察设计院有限公司

本标准主要起草人员：连文致 王亚凌 柴俊虎 张仲道 高斌峰 张新蕊

杨 洁 高 建 杨金龙 邵晓辉 王 群 郑建华

顾宗昂 魏成国 张 宁 刘 强 高玉杰 程书昌

左骁遥 彭 凯

本标准主要审查人员：

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	2
3 基本规定	5
4 设 计	6
4.1 一般规定	6
4.2 相关计算	7
I 均质人工地基	7
II 复合地基	9
5 施 工	12
5.1 一般规定	12
5.2 施工工艺	12
6 质量控制与质量检测	15
6.1 质量控制	15
6.2 质量检测	17
I 均质人工地基	17
II 复合地基	17
附录 A 处理后地基静载荷试验要点	19
附录 B 复合地基静载荷试验要点	20
附录 C 复合地基增强体单桩静载荷试验要点	22
附录 D 施工记录表式样	24
本标准用词说明	26
条文说明	27

Contents

1 General Provisions.....	1
2 terms and symbols.....	2
2.1 Terms.....	2
2.2 symbols.....	2
3 Basic provisions.....	5
4. Design.....	6
4.1 General Provisions.....	6
4.2 Correlation calculation.	7
I Homogenous artificial foundation	7
II Composite foundation	9
5. Construction.....	12
5.1 General Provisions	12
5.2 Construction technology:	12
6 Quality control and quality testing.....	15
6.1 Quality Control.....	15
6.2 Quality testing.....	17
I Homogenous artificial foundation.....	17
II Composite foundation	17
Appendix A: Key points of static load test of foundation after treatment	19
Appendix B : composite foundation static load test oints.....	20
Appendix C : The static load test points of single pile of composite foundation reinforced body.....	22
Appendix D : Construction Record Form Type.....	24
Specification Description.....	26
Explanation of Provisions.....	27

1 总 则

1.0.1 为了在预成孔深层夯实法的设计与施工中贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、经济合理、质量可靠、安全环保，制定本规程。

1.0.2 采用预成孔深层夯实法进行地基处理时，除满足工程设计要求外，应做到因地制宜、就地取材、保护环境、节约资源等。

1.0.3 本规程适用于预成孔深层夯实法地基处理的设计、施工与质量检验。

1.0.4 采用预成孔深层夯实法进行地基处理时，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 预成孔深层夯实技术 deep dynamic consolidation of pre-hole

一种地基处理施工技术，通过采用地基土中预成孔、不脱钩夯击、自动测量与记录等技术，实现在地下水位以下的深层地基土中进行施工。

2.1.2 均质人工地基 homogenous artificial foundation

天然地基经处理后，形成土质均匀稳定的、满足承载力及变形要求的人工地基。

2.1.3 复合地基 composite foundation

部分土体被增强或置换，形成由地基土和竖向增强体共同承担荷载的人工地基。

2.1.4 地基处理深度 depth of foundation treatment

自最初待处理的地基表面起算，经预成孔深层夯实法处理后地基土性状满足工程承载力、变形、稳定性要求的深度。

2.1.5 面积置换率 area replacement ratio

复合地基中，一根桩和它所承担的桩间土体为一复合土体单元。在这一复合土体单元中，桩的断面面积和复合土体单元面积之比。

2.1.6 桩土应力比 stress ratio of pile to soil

复合地基中增强体平均竖向应力与其桩间土平均竖向应力的比值。

2.1.7 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。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

E_0 ——土的变形模量；

E_s ——土的压缩模量；

\bar{E}_s ——变形计算深度范围内压缩模量当量；

f_{ak} ——天然地基承载力特征值；
 f_{spk} ——复合地基承载力特征值；
 f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值；
 n ——复合地基桩土应力比；
 μ ——土的泊松比；
 e_0 ——地基处理前地基土的孔隙比；
 e_1 ——自然堆积状态下填料的孔隙比；
 e_2 ——夯击密实后填料的孔隙比；
 e ——地基处理后要求达到的孔隙比；
 e_{\max} 、 e_{\min} ——土的最大、最小孔隙比；
 D_r ——地基处理后要求地基土达到的相对密度。

2.2.2 几何参数

h_1 ——每一分层累计夯沉量；
 h ——分层厚度；
 d_1 ——夯锤直径；
 d_0 ——成孔直径；
 d ——成桩直径；
 d_e ——一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径；
 V ——每孔累计填料量；
 H ——成桩长度；
 m ——面积置换率；
 s ——预成孔间距；
 s_1 ——纵向桩间距；
 s_2 ——横向桩间距。

2.2.3 计算参数

ζ ——地基承载力提高系数；
 ξ ——修正系数；
 ξ_1 ——修正系数；
 ψ_s ——复合地基的沉降计算经验系数。

3 基本规定

3.0.1 预成孔深层夯实法适用于处理素填土、杂填土、黏性土、湿陷性黄土等类型地基。

3.0.2 选择本方法进行地基处理前，应完成以下工作：

- 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 调查邻近建筑、地下工程、周边道路及有关管线等情况；
- 3 根据工程要求和地基存在的主要问题，确定地基处理范围以及处理后要求达到的各项技术经济指标等；
- 4 人工填土地基应了解原地表的地形地貌、地表水分布、植被以及填土前的排水、清淤等资料，并掌握填土的岩土性质、成分、颗粒级配等情况；
- 5 了解施工场地的周边环境情况。

3.0.3 预成孔深层夯实法孔内填料可采用碎石、砂土、灰土、黄土、建筑垃圾等材料，对于有特殊要求的地基，可使用或掺入水泥、石灰、粉煤灰等材料，但应避免对地下水、土体等造成污染。

3.0.4 在对预成孔深层夯实法进行参数设计时，应考虑上部结构、基础、地基等的共同作用，根据工程类别、场地土性质、周边环境、上部结构设计对地基处理深度、承载力、变形的要求，综合比选确定。

3.0.5 预成孔深层夯实法施工前，应在施工现场有代表性的场地选取若干试验区，进行试验性施工，检验地基处理效果与本工艺的适用性。试验区的面积、数量应根据建筑场地复杂程度、建筑规模及建筑类型确定。

3.0.6 预成孔深层夯实法施工过程中必须有专人负责质量监测和控制，出现异常情况时，及时会同有关部门妥善解决。

3.0.7 经预成孔深层夯实法处理后的地基，应进行承载力与变形评价、处理深度内的地基均匀性评价等。当形成挤密桩复合地基时，尚应进行增强体强度、桩间土强度及复合地基地基承载力评价。

3.0.8 预成孔深层夯实法地基处理的设计、施工、质量检验，除符合本规程的要求外，尚应符合国家现行有关技术标准与规范的规定。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 采用预成孔深层夯实法进行地基处理设计前，应详细掌握场地地基土性质及填料性质、地下水条件等情况。

4.1.2 预成孔深层夯实法地基处理设计应依据试验性施工结果进行。

4.1.3 预成孔深层夯实法的设计参数包括：成孔直径、成孔间距、成桩直径、处理深度、分层回填厚度、夯击能、收锤标准（夯击次数、分层累计夯沉量）、地基处理要求（地基承载力、变形指标、处理深度）等。

4.1.4 地基处理深度范围内存在砂土、淤泥（质）土等易塌孔的土层时，应采取下设钢护筒等简易可行的护壁措施。

4.1.5 地基处理深度范围内存在地下水时，应考虑水下夯击时夯击能量的损失。

4.1.6 孔内填料的分层厚度应与设计夯击能相适应，分层厚度宜为 1.0~4.0m，设计夯击能宜为 1000kN.m~4000kN.m。

4.1.7 孔内夯实的夯击次数按以下原则确定：

- 1 每一分层夯击次数不宜小于 3 击；
- 2 每一分层累计夯沉量不小于设计要求；
- 3 夯实过程中不应出现吸锤等现象导致提锤困难。

4.1.8 孔内施工可分遍 2~4 遍进行，具体分遍次数应根据土体性质、成孔直径、成孔间距确定。

4.1.9 各遍施工之间应有一定的间隔时间，间隔时间取决于土体中的超孔隙水压力消散时间。缺乏资料时，非饱和土体中可连续施工，饱和土体中间隔时间不应小于 7~14d。

4.1.10 当桩顶设计标高位于地面或地面以下小于 1.0m 时，孔内填料与夯实完成后，宜在地表进行一遍满夯施工，以加固表层土体。满夯能级 1000kN.m~2000kN.m，夯击次数 2~3 击，夯印搭接夯锤直径的 1/4~1/3。

4.1.11 成孔孔位允许偏差：对于条形基础的边桩，沿轴线方向为孔径的 $\pm 1/4$ ，垂直轴线方向为孔径的 $\pm 1/6$ ；其他情况为孔径的 $\pm 40\%$ 。成孔垂直度允许偏差为 $\pm 1\%$ 。

4.1.12 孔位布置宜采用正三角形、正方形布置；对于条形基础，可采用沿基础轴

线单排布置或对称轴线多排布置。

4.2.13 设计成桩直径可根据地基土质情况、成孔方式及施工设备等因素综合确定，宜为 600mm~1500mm；成孔直径一般取设计成桩直径的 2/3~4/5。

4.2 相关计算

4.2.1 每一分层累计夯沉量不宜小于填料厚度的 0.5 倍；初步设计时，可按下列公式估算：

$$\frac{h_1}{h} = \xi \frac{e_1 d^2 - e_2 d_0^2}{e_1 d^2 - e_2 (d_0^2 - d_1^2)} \quad (4.2.1)$$

式中： h_1 ——每一分层累计夯沉量(m)；

h ——分层厚度(m)；

ξ ——修正系数，可取 1.1~1.2；

d_1 ——夯锤直径(m)；

d_0 ——成孔直径(m)；

d ——成桩直径(m)；

e_1 ——自然堆积状态下填料的孔隙比；

e_2 ——夯击密实后填料孔隙比，无实测资料时，可取填料最小孔隙比。

4.2.2 每孔累计填料量，初步设计时，可按下列公式估算：

$$V = \frac{1}{4} \xi_1 \pi d^2 H \frac{e_1}{e_2} \quad (4.2.2)$$

式中： V ——每孔累计填料量(m³)；

H ——成桩长度(m)；

ξ_1 ——修正系数，可取 1.05~1.1。

I 均质人工地基

4.2.3 采用预成孔深层夯实法处理松散的素填土、杂填土或湿陷性黄土等地基时，可根据地基处理要求，在孔内填入原地基土性质相同的填料，形成均质人工地基。

4.2.4 地基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 1/2~2/3，且不应小于 3m；对于可液化地基，不应小于 5m；对湿陷性黄土地区，应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 的有关规定。

4.2.5 孔距宜为成桩直径的 2.5~4.0 倍，且不应大于成桩直径的 5.0 倍；初步设计时，可按下列公式估算：

正方形布置

$$s = 0.886d \sqrt{\frac{e_0 d^2 - e d_0^2}{e_0 - e}} \quad (4.2.5-1)$$

$$e = e_{\max} - D_r(e_{\max} - e_{\min}) \quad (4.2.5-2)$$

正三角形布置

$$s = 0.952d \sqrt{\frac{e_0 d^2 - e d_0^2}{e_0 - e}} \quad (4.2.5-3)$$

式中： s ——孔距(m)；

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

e ——地基处理后要求达到的孔隙比；

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

D_r ——地基处理后要求地基土达到的相对密度，可取 0.8~0.95。

4.2.6 设计成孔深度（处理深度）：应穿过较松散土层，达到相对较硬或密实的土层；若相对硬土层埋藏较深，应按地基变形允许值计算确定；对于可液化地基，应按要求处理液化的深度确定。

4.2.7 处理后地基承载力，应按本规范附录 A 的方法确定。

4.2.8 处理后地基的变形计算，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。处理深度内土层的压缩模量，应通过原位测试或土工试验确定。

II 复合地基

4.2.9 当预成孔深层夯实法的孔内填料明显好于原地基土时，根据填料的不同，时可形成碎石桩、砂石桩、灰土桩、素土桩、水泥土桩等复合地基。

4.2.10 地基处理范围应根据建筑物的重要性和场地条件确定，并应符合下列规定：

1 砂石桩与碎石桩：宜在基础外缘扩大 1~3 排桩；对于可液化地基，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，且不小于 5m。

2 灰土桩与素土桩：采用整片处理时，超出基础外缘的宽度，每边不宜小于处理土层厚度的 1/2，且不应小于 2m；采用局部处理时，对非自重湿陷性黄土、素填土、和杂填土等地基，每边不应小于基础底面宽度的 25%，且不小于 0.5m；对自重湿陷性黄土地基，每边不应小于基础底面宽度的 75%，且不小于 1.0m。

3 水泥土桩：可仅在基础范围内布桩。

4 湿陷性黄土地区，尚应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 的有关规定。

4.2.11 桩间距宜根据上部荷载大小、场地土层情况，并结合现场试验确定；对桩间土有加固要求时，桩间距宜为成桩直径的 2.5~4.0 倍。

4.2.12 桩长可根据工程要求和工程地质条件，通过计算确定并符合下列规定：

1 下卧硬土层埋藏较浅时，应穿过软弱或松散土层，达到下卧硬土层；

2 下卧硬土层埋藏较深时，应按地基变形允许值计算确定；

3 对于可液化地基，应根据抗液化措施要求，按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的相关条款执行。

4.2.13 孔内填料性质应符合下列规定：

1 碎石桩：可采用含泥量不大于 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，粒径不应大于孔径的 1/3，且不大于 500mm；

2 砂石桩：可采用含泥量不大于 5%的碎石、卵石、角砾、圆砾、砾砂、粗砂、中砂或石屑等硬质材料，最大粒径不宜大于孔径的 1/3，且不大于 500mm；

3 素土桩：宜选用粉质粘土或黏土，有机质含量不应超过 5%；

4 灰土桩：采用石灰与土的拌合料。土料宜选用粉质粘土，有机质含量不应超过 5%，且不得含有冻土。石灰可选用新鲜的消石灰粉，质量应合格，有效 MgO+CaO 含量不低于 60%。

4.2.14 桩顶与基础之间宜铺设厚度为 300mm~500mm 的垫层，垫层材料宜选用中砂、粗砂、级配砂石和碎石等，最大粒径不宜大于 30mm，夯填度不应大于 0.9。

4.2.15 预成孔深层夯实法处理后的地基承载力特征值应通过复合地基静载荷试验或采用增强体静载荷试验结果和桩间土的承载力特征值结合经验确定，初步设计时，可按下列公式估算：

$$f_{spk} = [1 + m(n - 1)]f_{sk} \quad (4.2.15)$$

式中： f_{spk} ——复合地基承载力特征值(kPa)；

f_{sk} ——处理后桩间土承载力特征值(kPa)；初步设计时，可按地区经验确定，可取天然地基承载力的 1.0~2.0 倍，原土强度低取大值，原土强度高取小值；渗透性好取大值，渗透性差取小值；非饱和土取大值，饱和土取小值；

n ——复合地基桩土应力比，可按地区经验确定，黏性土可取 2.0~4.0，砂土、粉土可取 1.5~3.0；

m ——面积置换率， $m = d^2/d_e^2$ ； 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。

4.2.16 处理后地基变形计算应符合国家现行《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定，地基变形计算深度应大于复合土层的深度。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 ζ 倍， ζ 按下式确定：

$$\zeta = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} \quad (4.2.16)$$

式中： ζ ——地基承载力提高系数；

f_{ak} ——基础底面下天然地基承载力特征值。

4.2.17 处理后复合地基的沉降计算经验系数 ψ_s 应根据地区沉降观测资料及经验确定，当无经验时，可按表 4.2.17 取值。

表 4.2.17 复合地基沉降计算经验系数

\bar{E}_s	4.0	7.0	15.0	20.0	35.0
ψ_s	1.0	0.7	0.4	0.25	0.2

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

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i + \sum A_j}{\sum \frac{A_i}{E_{spi}} + \sum \frac{A_j}{E_{spj}}} \quad (4.2.17)$$

式中： A_i ——加固土层第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值；

A_j ——加固土层下第 j 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值。

4.2.18 处理后复合地基承载力，应按本规范附录 B 的方法确定；复合地基增强体的单桩承载力，应按本规范附录 C 的方法确定。

5 施工

5.1 一般规定

5.1.1 采用预成孔深层夯实法施工的场地，应进行下列评价工作：

- 1 场地交通运输条件；
- 2 建筑场地中孤石、坚硬夹层、岩溶、土洞、液化土层和构造断裂等不良地质现象对施工的影响；
- 3 预成孔深层夯实施工对周边环境的影响；
- 4 预成孔深层夯实孔内填料条件。

5.1.2 预成孔深层夯实法处理地基前，应具备场地工程地质勘察报告、地下管线埋置情况、周边建筑物状况以及工程设计图纸、施工组织设计、施工工艺参数标准等资料。

5.1.3 成孔设备应根据地质条件选用长螺旋钻机、旋挖钻机、冲击钻机等，强夯设备应具有不脱钩施工、自动测量与记录功能。

5.1.4 根据设计孔径与夯击能确定夯锤的规格，分层夯击施工，夯锤直径一般为设计孔径的 0.8~0.9 倍，夯击重量根据夯击能大小一般选择 5~20T，夯锤主体部分呈圆柱形或正多边形柱状体，夯锤端部为与锤体垂直的平面，不应采用端部为锥形的夯锤；满夯施工一般采用重量 10~20T 直径 2.0~3.0m 的圆形铸钢锤。

5.1.5 在正式开工前宜先进行试验性施工，以验证施工参数的合理性及地基处理效果是否满足要求，试验施工的数量及位置应根据场地条件及设计参数等要求选择具有代表性的地块进行。

5.2 施工工艺

5.2.1 预成孔深层夯实法施工应按以下步骤进行：

- 1 清理、平整场地，测放孔位，在地基中预成孔；
- 2 孔内第一次填料，填料量以分层厚度进行控制；
- 3 孔内第一次夯实，逐次夯击直至满足收锤标准；
- 4 重复步骤 2~3，由下而上，逐层回填逐层夯实，填料、夯击交替进行，

直至达到设计要求的桩顶标高，完成一个孔位的施工；

5 重复步骤 1~4，完成全部孔位施工；

6 采用满夯夯实表层土体。

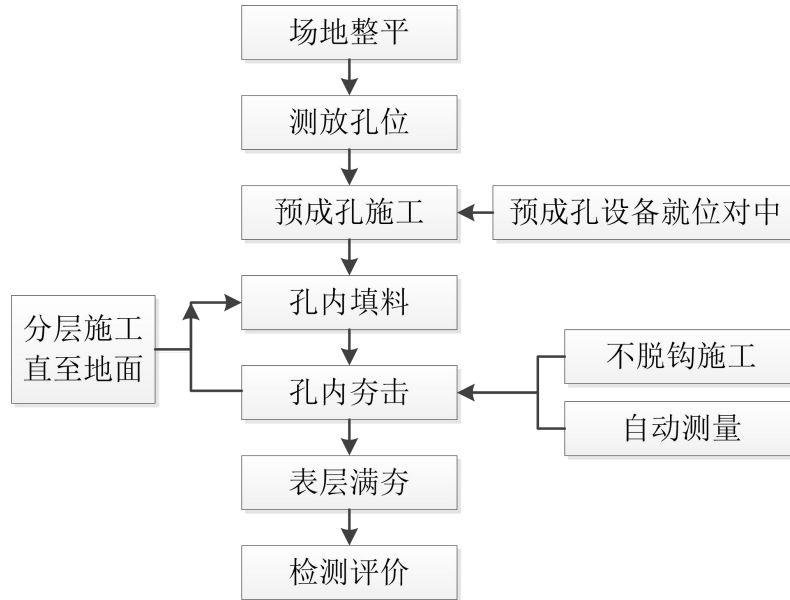


图 5.2.1 预成孔深层夯实法施工工艺流程图

5.2.2 预成孔作业应符合下列规定：

- 1 成孔设备就位前，应进行孔位复测，钻头中心对准孔位，调平钻机；
- 2 钻进深度范围内存在砂土、淤泥（质）土等易塌孔的土层时，应采取下设钢护筒等简易可行的护壁措施；
- 3 成孔时，根据地层与成孔设备合理控制钻进速度，避免孔壁坍塌；
- 4 钻渣应及时进行清理；
- 5 成孔深度不应小于设计要求；
- 6 钻进至设计深度后，应及时清理孔底沉渣，沉渣厚度 $\leq 100\text{mm}$ 。

5.2.3 孔内填料与夯实作业应符合下列规定：

- 1 施工前应对填料强度、粒径、含泥量等指标进行检验，合格后方可使用；
- 2 在地下水位界面及较松散、薄弱土层处，可适当减小填料分层厚度与夯击能，并适当增加夯击次数；
- 3 夯击过程中，夯锤应慢速上提，避免扰动孔壁造成塌孔；
- 4 夯击过程中如果出现提锤困难时，应判断具体原因，当孔内存在淤积的软土或泥渣时，应在夯锤提出后采用旋挖等方式进行清孔后再进行夯击，避免桩体

存在软弱夹层；

5 成孔完成后应立即进行孔内填料与夯实施工，孔内填料与夯实施工应连续进行，避免长时间放置后孔壁坍塌；

6 成桩桩顶标高应高于设计桩顶标高不少于 0.5m。

5.2.4 在施工过程中，应随时关注孔壁的稳定性和完整性。如发现孔壁稳定性差或发生坍塌时，应立即停止施工并及时采取措施进行处理。

5.2.5 根据地质情况，施工中可采取隔行跳打、分遍施工等措施，以避免施工过程中的振动、挤压导致相邻孔位塌孔或缩径。

5.2.6 施工过程中应由专门的技术人员作好每根桩的施工记录，并进行核查，如发现问题应及时进行分析与处理。施工记录应包括钻孔直径、钻孔深度、沉渣厚度、夯击能、分层夯击次数、分层填料厚度、分层填料量、分层累计夯沉量、累计填料量等内容。

6 质量控制与质量检测

6.1 质量控制

6.1.1 均质人工地基检验标准应符合表 6.1.1-1 的规定，复合地基检验标准应符合表 6.1.1-2 的规定。

表 6.1.1-1 预成孔深层夯实法均质人工地基质量检验标准

项目	序号	检查项目	允许偏差	检查方法
主控项目	1	地基承载力	不小于设计要求	静载试验
	2	变形指标	不小于设计要求	原位测试
	3	地基强度	不小于设计要求	原位测试
	4	成孔深度	不小于设计要求	测绳法
一般项目	1	成孔直径	不小于设计要求	钢尺检查
	2	孔位	条基边桩沿轴线 $\leq 1/4d$	全站仪
			条基边桩垂直轴线 $\leq 1/6d$	
			其他情况 $\leq 0.4d$	
	3	垂直度	$\pm 1\%$	经纬仪测钻杆
	4	沉渣厚度	$\leq 100\text{mm}$	测绳法
	5	填料厚度	$\pm 200\text{mm}$	夯机自动测量
	6	夯锤落距	$+300\text{mm}$	钢索设标志
	7	锤重	$+100\text{kg}$	称重
	8	夯击次数	不小于设计要求	夯机自动记录
9	分层累计夯沉量	不小于设计要求	夯机自动测量	
10	每孔累计填料量	不小于设计要求	容器测量	

表 6.1.1-2 预成孔深层夯实法复合地基质量检验标准

项目	序号	检查项目	允许偏差	检查方法
主控项目	1	复合地基承载力	不小于设计要求	静载试验
	2	桩间土强度	不小于设计要求	原位测试
	3	桩身强度	不小于设计要求	原位测试
	4	桩长	不小于设计要求	测绳测孔深
	5	成桩直径	不小于设计要求	钢尺检查
一般项目	1	成孔直径	不小于设计要求	钢尺检查
	2	孔位	条基边桩沿轴线 $\leq 1/4d$	全站仪
			条基边桩垂直轴线 $\leq 1/6d$	
			其他情况 $\leq 0.4d$	
	3	垂直度	$\pm 1\%$	经纬仪测钻杆
	4	沉渣厚度	$\leq 100\text{mm}$	测绳法
	5	填料质量	按设计要求	取样测试
	6	填料厚度	$\pm 200\text{mm}$	夯机自动测量
	7	夯锤落距	$+300\text{mm}$	钢索设标志
	8	锤重	$+100\text{kg}$	称重
	9	夯击次数	不小于设计要求	夯机自动记录
	10	分层累计夯沉量	不小于设计要求	夯机自动测量
	11	每孔累计填料量	不小于设计要求	容器测量
12	桩顶标高	$\pm 200\text{mm}$	全站仪	
13	褥垫层夯填度	≤ 0.9	全站仪	

- 6.1.2** 预成孔作业前，应对孔位放线进行复核，发现偏差应及时纠正。
- 6.1.3** 预成孔时，必须按成孔质量要求对成孔直径、垂直度、孔深、沉渣厚度进行检查，满足成孔质量标准后方可进行夯实作业。
- 6.1.4** 夯实作业前，应检查填料质量、夯锤重量、落距。
- 6.1.5** 夯实作业时，应严格检查每一层的填料厚度、夯击次数、分层累计夯沉量，并按要求进行控制。
- 6.1.6** 每孔施工完成后，应按要求核算每孔累计填料量，测量桩顶标高与成桩直径。
- 6.1.7** 褥垫层施工时应严格控制材料质量与夯填度。
- 6.1.8** 表层满夯时，应严格控制夯击次数及夯印搭接质量。
- 6.1.9** 施工过程中，必须认真检查各项测试数据和施工记录，并对各项施工参数和施工情况进行详细记录。

6.2 质量检测

I 均质人工地基

- 6.2.1** 均质人工地基质量检测的内容包括：地基承载力、变形指标、地基强度等。
- 6.2.2** 施工完成后，应间隔一定时间方可进行质量检测，对非饱和土地基，间隔时间应不少于为 7d，对饱和土地基，间隔时间宜为 14~28d。
- 6.2.3** 地基强度与变形指标检测，可采用动力触探、标准贯入、静力触探以及室内土工试验对地基土进行抽样检验。抽检的数量应符合下列规定：
- 1** 对于简单场地或一般建筑地基，按每 400 m² 不少于 1 点，且不少于 3 点；
 - 2** 对于复杂或重要建筑地基，按每 300 m² 不少于 1 点，且不少于 3 点。
- 6.2.4** 地基承载力应按照本规程附录 A 进行静载荷试验检验，并结合动力触探、标准贯入、静力触探等试验结果综合评定。静荷载试验点不应少于总钻孔数量的 1%，且每个建筑地基不少于 3 点，对于复杂场地或重要建筑应增加检测点数。

II 复合地基

- 6.2.5** 复合地基质量检测的内容包括：复合地基承载力、桩间土强度、桩身强度

等。

6.2.6 施工完成后，应间隔一定时间方可进行质量检测，对非饱和土地基，间隔时间应不少于为 7d，对饱和土地基，间隔时间宜为 14~28d。

6.2.7 桩体强度检验可采用动力触探、标准贯入以及室内土工试验，桩间土强度检验可采用动力触探、标准贯入、静力触探以及室内土工试验。桩间土的检测位置应在桩位布置的正方形或等边三角形等的中心处。桩体强度与桩间土强度检验深度不应小于地基处理深度，检验数量分别不应少于桩孔数量的 2%，且桩身及桩间土检验点数均不应少于 3 点。

6.2.8 处理后的复合地基承载力应按照本规程附录 B 进行复合地基静载荷试验检验，试验点数不应少于总桩数的 1%，且每个单体工程不应少于 3 点。

附录 A 处理后地基静载荷试验要点

A.0.1 本试验要点适用于预成孔深层夯实法回填料与原地基土相同并形成均匀人工地基时，地基承载力和变形参数的确定。

A.0.2 承压板面积应按需检验土层的厚度确定，且不小于 2.0 m^2 。

A.0.3 试验坑宽度不应小于承压板边长或直径的 3 倍。宜在拟试压的表面用粗砂或中砂层找平，厚度不超过 20mm 。基准梁的支点应设在试坑之外，且与承压板的净距不应小于 2m 。

A.0.4 试验前应采取防水和排水措施，防止因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 加荷分级不应少于 8 级。最大加载压力不应小于设计要求压力值的 2 倍。

A.0.6 每级加载后，按每隔 10min 、 10min 、 10min 、 15min 、 15min ，以后每 0.5 小时读记一次，当在连续 2 小时内，每小时的沉降量小于 0.1mm 时，可加下一级荷载。

A.0.7 终止加载条件，当出现下列情况之一时，即可终止加载：

- 1 沉降急剧增大，压力-沉降曲线出现陡降段；
- 2 土被挤出或承压板周围出现明显的隆起；
- 3 某一级荷载下，24 小时内达沉降速率达不到稳定标准；
- 4 承压板的累计沉降量已大于其宽度或直径的 6% 。

A.0.8 处理后地基承载力特征值的确定应符合下列规定：

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，取比例界限；当其值小于对应比例界限的 2 倍时，取极限荷载的一半；

2 当不能按上述要求确定时，可取 s/b 或 s/d 等于 0.01 时所对应的压力，但其值不应大于最大加载量的一半。承压板的宽度或直径大于 2m 时，按 2m 计算（ s 为承压板的沉降量， b 和 d 分别为承压板的宽度和直径）。

A.0.9 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，可取其平均值为预成孔深层夯实地基承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析原因，必要时增加试验数量，并结合工程具体情况确定处理后地基承载力特征值。

附录 B 复合地基静载荷试验要点

B.0.1 本试验要点适用于预成孔深层夯实法回填料明显优于原地基土并形成挤密桩复合地基时，地基承载力和变形参数的确定。

B.0.2 复合地基静载荷试验适合于测定承压板下应力主要影响范围内复合土层的承载力。承压板应具有足够的刚度，可采用圆形或方形，面积为一根桩所承担的面积。静载荷试验桩中心点应与承压板中心保持一致，并与荷载作用点重合。

B.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 100~150mm。试验标高处的试坑长度和宽度，不应小于承压板尺寸的 3 倍。基准梁的支点应设在试坑之外，且与承压板的净距不应小于 2m。

B.0.4 加荷等级可分为 8~12 级。最大加载压力不应小于设计要求压力值的 2 倍。

B.0.5 试验前应采取防水和排水措施，防止因试验场地地基土含水量变化或地基土扰动影响试验结果。

B.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 0.5h 读记一次，当 1h 内沉降量小于 0.1mm 时，即可加下一级荷载。

B.0.7 终止加载条件，当出现下列情况之一时，即可终止加载：

- 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。

B.0.8 卸载级数可为加载级数的 1/2，等量进行，每卸一级间隔 0.5h，读记回弹量，待卸完全部荷载后间隔 3h 读记总回弹量。

B.0.9 处理后地基承载力特征值的确定应符合下列规定：

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，取比例界限；当其值小于对应比例界限的 2 倍时，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，可取 s/b 或 s/d 等于 0.01 时所对应的压力，但其值不应大于最大加载量的一半。承压板的宽度或直径大于 2m 时，按 2m 计算（ s 为承压板的沉降量， b 和 d 分别为承压板的宽度和直径）。

B.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

取其平均值为预成孔深层夯实复合地基承载力特征值。当极差超过平均值的 30% 时，应分析原因，必要时增加试验数量，并结合工程具体情况确定复合地基承载力特征值。

附录 C 复合地基增强体单桩静载荷试验要点

C.0.1 本试验要点适用于预成孔深层夯实法形成复合地基时，增强体的单桩竖向抗压静载荷试验。

C.0.2 试验加载方式应采用慢速维持荷载法。

C.0.3 试验提供的反力装置可采用锚桩法或堆载法。当采用堆载法加载时，应符合下列规定：

1 堆载支点施加于地基的压应力不宜超过地基承载力特征值；

2 堆载的支墩位置以不对试桩和基准桩的测试产生较大影响的原则确定，无法避开时应采取有效措施；

3 堆载量大时，可利用工程桩作为堆载支点；

4 试验反力装置的承重能力应满足试验加载要求。

C.0.4 堆载支点以及试桩、锚桩、基准桩之间的中心距离应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定。

C.0.5 试压前应对桩头进行加固处理。强度较高的桩，桩顶宜设置带水平钢筋网片的混凝土桩帽或采用钢护筒桩帽，其混凝土宜提高强度等级和采用早强剂。桩帽高度不宜小于 1 倍桩的直径。

C.0.6 桩帽下复合地基增强体单桩的桩顶标高及地基土标高应与设计标高一致，加固桩头前应凿成平面。

C.0.7 百分表架设位置宜在桩顶标高位置。

C.0.8 开始试验的时间、加载分级、测读沉降量的时间、稳定标准及卸载观测等应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 的有关规定。

C.0.9 当出现下列条件之一时可终止加载：

1 当荷载-沉降（ $Q-s$ ）曲线上有可判定极限承载力的陡降段，且桩顶总沉降量超过 40mm；

2 $\frac{\Delta s_{n+1}}{\Delta s_n} \geq 2$ ，且经 24h 沉降尚未稳定；

3 桩身破坏，桩顶变形急剧增大；

4 当桩长超过 25m， $Q-s$ 曲线呈缓变形时，桩顶总沉降量大于 60mm~80mm；

5 验收检验时，最大加载量不应小于设计单桩承载力特征值的 2 倍。

注： Δs_n ——第 n 级荷载的沉降增量； Δs_{n+1} ——第 $n+1$ 级荷载的沉降增量。

C.0.10 单桩竖向抗压极限承载力的确定应符合下列规定：

- 1 作荷载-沉降 ($Q-s$) 曲线和其他辅助分析所需的曲线；
- 2 曲线陡降段明显时，取相应于陡降段起点的荷载值；
- 3 当出现本规范第 C.0.9 第二款的情况时，取前一级荷载值；
- 4 $Q-s$ 曲线呈缓变形时，取桩顶总沉降量 s 为 40mm 所对应的荷载值；
- 5 按上述方法判定有困难时，可结合其他辅助分析方法综合判定；

6 参加统计的试桩，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，设计可取其平均值为单桩极限承载力；极差超过平均值的 30% 时，应分析离差过大的原因，结合工程具体情况确定单桩极限承载力；需要时应增加试桩数量。工程验收时应视建筑物结构、基础形式综合评价，对于桩数少于 5 根的独立基础或桩数少于 3 排的条形基础，应取最低值。

C.0.11 将单桩极限承载力除以安全系数 2，为单桩承载力特征值。

夯实施工记录表

工程名称		设计桩径					设计桩长					沉渣厚度		施工机组			
施工区域		夯击能量					锤重					落距					
施工日期	夯点编号	测量值	分层												累计值	桩顶标高 (m)	备注
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
		夯击次数															
		夯沉量(m)															
		填料量(m³)															
		夯击次数															
		夯沉量(m)															
		填料量(m³)															
		夯击次数															
		夯沉量(m)															
		填料量(m³)															

记录人：

班组长：

技术负责人：

监理工程师：

本标准用词说明

E.0.1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对于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 表示稍有允许选择，在条件许可时，首先应这样做的：

正面词采用“宜”或“可”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

E.0.2 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）”。

中国石油和化工勘察设计协会团体标准

预成孔深层夯实技术标准

T/HGJ XXXXX-2023

条文说明

制订说明

《预成孔深层夯实技术标准》T/HGJ XXXXX-2023，经 XXXX2023 年 X 月 X 日以第 X 号公告批准、发布。

本标准制订过程中，编制组开展了专题研究，调查、研究和总结了预成孔深层夯实技术的工程实践及施工经验，参考国内外同类技术的标准规范，取得了重要技术参数。

为方便广大设计、施工、科研等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《预成孔深层夯实技术标准》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。由于本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

1	总 则	2
3	基本规定	4
4	设 计	5
4.1	设计原则	5
4.2	一般规定	错误! 未定义书签。
5	施 工	9
5.1	施工准备	9
5.2	施工工艺	9
6	质量控制与质量检测	10
6.1	质量控制	10
6.2	质量检测	11

1 总 则

1.0.1 随着工程建设的飞速发展，回填深度大于 15m 的填海造地工程越来越多，该类工程地基处理深度大、地下水位高且下卧淤泥质软弱土层，地基处理需要很高的技术水平。预成孔深层水下夯实法是专门针对该类地基处理工程中的技术难点开展创新研究取得的技术成果，已在地基处理工程中得到应用并取得了良好的地基处理效果与经济效益。本方法是一种采用地基土中预成孔、不脱钩技术与特殊设计的夯锤，实现了在地下水位以下的深层地基土中进行施工的地基处理方法。该地基处理方法可实现提高地基稳定性、提高承载能力、减少(不均匀) 沉降变形、改善渗透性、消除液化与湿陷性等目的，它具有以下技术特点：

(1) 夯锤在水中起落，与地基土作用点位于地下水位以下，可进行深层水下施工，适用于处理深度大、地下水位高等条件下进行地基处理；

(2) 在预成孔内分层回填分层夯实，分层厚度与夯击能相匹配，夯击能从常规的 1000 kN·m 能级提高至 4000kN·m 能级，可对夯间土同时产生挤密和夯实的效果；

(3) 可根据不同地质条件采用旋挖、冲击、长螺旋钻进、柱锤冲扩等方法在回填地基中预先成孔，直接穿透回填土层与下卧软土层；

(4) 采用设置特殊导流孔的夯锤，以最大限度消除地下水对夯击能的损耗，保证地基加固效果；

(5) 采用夯锤不脱钩、自动测量、远程操控技术，实现了深层孔内连续作业；

(6) 当孔内填料与地基土性质相同时，形成均质人工地基；当孔内填料性质明显好于地基土时，可形成挤密桩复合地基。

(7) 处理后的地基可有效消除土层自重固结，具有地基承载力高、地基变形小的特点。

2 术语和符号

2.1.1 预成孔深层夯实技术首先在地基土中预先成孔，直接穿透回填土层与下卧软土层，然后在孔内由下而上逐层回填、逐层夯实加固地基土。当孔内填料与地基土性质相同时，形成均质人工地基；当孔内填料性质明显好于地基土时，可形成挤密桩复合地基。对地基土产生挤密、冲击与振动夯实等多重效果。孔内填料采用粗颗粒材料形成良好的排水通道，软弱土层能够得到有效固结，形成散体桩的同时实现桩间土有效加固。

2.1.2 均质人工地基是指预成孔后，孔内填料采用与周边地基土一致的土回填并处理后形成的地基。

2.1.3 复合地基是指采用特定的回填材料进行孔内回填，回填材料为碎石土、灰土、砂土、黄土、建筑垃圾等。建筑垃圾是指渣土、混凝土块、碎石块、砖瓦碎块等具有一定硬度的工程废弃物。

3 基本规定

3.0.1 预成孔深层水下夯实法适用各种性质的土体，既可用于饱和软粘土，也可用于松散粗颗粒土；应用范围广，既可用于高填方地基，也可用于深厚原状土地基。

3.0.2 本条是采用本方法前的准备工作，强调必须要了解邻近建筑、地下工程、地下管线、地下水、周边环境等情况。

3.0.3 除软弱饱和土外，各种性质的土石料，包括建筑垃圾，均可用于孔内填料。应根据工程需要，选择与原地基土相同或优于地基土的填料，同时应避免采用对地下水、土造成污染的材料。根据地基处理工程的要求，本方法可形成不同性质的人工地基：

（1）透水性良好地粗颗粒土中，可就地取材，在孔内填入与被加固土体相同的材料，通过夯实与挤密使地基土得到均匀加固，形成均质人工地基；

（2）在较软弱地基中，可在孔内填入性质与透水性均较好的粗颗粒材料，形成挤密桩体复合地基。

3.0.4 采用预成孔深层水下夯实法前，应当从具体工程需要角度出发，充分考虑上部结构、基础形式等因素综合分析，以确定最优方案，得到满意的效果。

3.0.5 预成孔深层水下夯实法是一项新技术，经验性很强，因场地差异性带来的处理效果及适用性的差异不可避免，因此当设计参数初步确定后，应进行现场试验，并做必要的检测，以检验设计参数及处理效果。

3.0.6 地基处理工程是隐蔽工程，尤其是采用本方法时，涉及水下作业，在施工中难免有与设计 and 场地条件不符的情况，或一些突发性问题的出现，所以必须由施工技术人员专人监督，及时解决问题。

3.0.7 预成孔水下深层夯实法处理后的地基，主要通过静载荷试验、动力触探、土工试验等进行效果检测，还应对增强体质量、桩间土的处理效果等进行评价。

4 设计

4.1 一般规定

4.1.1 预成孔深层夯实法是一种新型技术，为做到技术优化、安全适用且经济合理，采用本方法之前应通过详细踏勘、调查，设计前应具备以下资料及条件：

- 1 场地内岩土工程勘察报告；
- 2 周边已有建构筑物情况；
- 3 拟建建构筑物荷载要求及结构类型等；
- 4 可供利用的填料性质。

4.1.2 预成孔深层夯实法设计参数及施工能级要求等应根据试验性施工结果进行调整。

4.1.3 预成孔深层夯实法在设计时应考虑预钻孔及强夯两个工艺的参数要求。包括钻孔时的直径，钻孔布置方式，强夯夯击能，夯击次数，孔内填料的单次厚度，孔内填料性质，孔内强夯施工的收锤标准，都需要在设计方案中给出明确的要求。

4.1.4 若施工场地内的地层存在局部软弱夹层，必要时在设计时应考虑到钻孔时采取的护筒等简单易施行的护壁措施，防止塌孔严重导致孔底软弱土体过厚，从而影响墩体底部密实度。

4.1.5 预成孔深层夯实法可以进行水下施工，在地下水位过高时，设计夯击能参数时应考虑到锤体在孔内夯击时，水对锤体自由下落的阻力，从而导致的夯击能量损失。

4.1.6 孔内的填料厚度应与夯击能处理深度有关。累计填料量大于桩长的 1.5~2.0 倍，实际上也是充盈系数的概念，此处以长度比代替体积比。填料分层的厚度应与设计夯击能相匹配，宜为 0.5~4.0m，当设计夯击能高时取大值，反之取小值。在地下水位界面及土层界面处，填料分层厚度应适当减小。

4.1.7 夯实过程中若孔内地下水位较高，回填料遇水软化，为避免出现吸锤现象并提锤困难，尽量换填碎石类填料，并应密切关注锤孔疏通性，及时清锤。

4.1.8 设计时，孔内夯击遍数的设定应考虑回填料性质、含水性，避免出现吸锤。夯击次数一般根据末两击平均夯沉量进行控制。

4.1.9 地基土超静孔隙水压力的消散速率，与土的类别、夯点间距等因素有关。有条件的情况下，可以预先在地基中安装孔隙水压力计，通过实测确定超静孔隙水压力

的消散时间。当缺少实测资料时，按本条的规定确定间隔时间。

4.1.10 表层土是基础的主要持力层，如处理不好将会增加建筑物的沉降和不均匀下沉。因此，本规程强调，若桩顶设计标高位置较浅（地面下 1.0m 以内）时，表层必须进行一遍满夯夯实处理，夯印搭接。

4.1.12 预成孔深层水下夯实法（孔位）的布置一般可采用正三角形或正方形满堂布置，如果考虑基础形式和上部结构荷载的分布，也可以采取其他布置形式。

4.2 相关计算

I 均质人工地基

4.2.4 由于基础的应力扩散作用和抗震设防的需要，预成孔深层夯实法的处理范围应大于建筑物基础的范围，具体放大范围可根据建筑结构类型和重要性等因素考虑确定。对于一般建筑物，每边超出基础外缘的宽度宜为基底下设计处理深度的 $1/2 \sim 2/3$ ，且不应小于 3m。对于可液化地基，基础边缘的处理宽度不应不小于 5m；对湿陷性黄土地区，应符合现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025 的有关规定。

4.2.5 预成孔深层夯实法均质人工地基的预钻孔的间距，应根据处理后地基承载力和变形的要求以及对地基土要达到的挤密要求确定。

4.2.6 预成孔深层夯实法的处理深度，一般根据地基的稳定性和变形验算确定，当松散土层厚度不大时，处理深度宜超过整个松散土层。对可液化地基，为保证处理效果，一般应穿透液化层，如可液化层过深，则应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定确定。

4.2.7 预成孔深层夯实法均质人工地基地基的承载力检测，除了现场静载试验外，也可根据地基土性质，选择静力触探、动力触探、标准贯入试验等原位测试方法和室内土工试验结果结合静载试验结果综合确定。

II 复合地基

4.2.10 基于基础压力扩散的要求，地基处理范围要超出基础一定宽度。

对砂桩或碎石桩，为保证挤密效果，应加宽 1~3 排桩。对重要的建筑以及要求荷载较大的情况应加宽更多。

对素土桩与灰土桩，每边超出基础外缘的宽度不宜小于处理土层厚度的 $1/2$ ，且不应小于 2m，既可以保证应力扩散，又可以防止水从侧向渗入未处理的下部土层引

起湿陷，即兼有防渗隔水作用。

4.2.11 桩间距与设计要求的复合地基承载力、原地基土的性质有关，根据经验，桩间距一般可取桩径的 2~3 倍。

4.2.12 桩长应根据地基的稳定性和变形验算确定，当软土或松散土层厚度不大时，处理深度宜超过整个软土或松散土层。对可液化地基，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 有关规定确定。

当建筑物荷载不均匀或地基主要压缩层不均匀，建筑物沉降会存在差异沉降，当差异沉降过大，则会使建筑物受到破坏。为了减少差异沉降，可分区采用不同桩长进行加固，用于调整差异沉降。

4.2.13 对填料的级配和粒径进行控制是非常重要的，级配不良或大块石过多，土体不易密实，容易在地基中留有孔隙，在后续施工或建筑物使用过程中沉降增加。

对于灰土填料，为防止吸水后产生膨胀，不得使用生石灰与土拌合，应消解后与黄土或其他土料拌合，石灰富含钙离子，与土混合后产生离子交换作用，在较短时间内便成为硬材料，因此拌合后的灰土放置时间不可太长，并宜于当日使用完毕。

4.2.14 设置垫层起到水平向排水作用，加快土层的固结。对基础起到应力扩散作用，降低桩及桩周土的附加应力，减少桩体侧向变形，从而提高复合地基承载力，减少地基变形量。

4.2.15 复合地基的桩土应力比应按试验或地区经验取值，但由于地基土的固结条件不同，长期荷载作用下的桩土应力比与试验条件下的结果有一定的差异，设计时应充分考虑。

处理后的桩间土承载力与原土强度、类型等密切相关。对于可挤密的松散砂土和粉土，处理后的桩间土承载力会比原土承载力有一定幅度的提高；而对于粘性土特别是饱和粘性土，施工后有一定时间的休止恢复期，过后可达到原土承载力。

4.2.16 复合地基沉降计算目前仍以经验方法为主。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 综合各种复合地基的工程经验，提出以分层总和法为基础的计算方法。各地可根据地区土的工程特性、工程试验结果以及工程经验，采用适宜的方法，以积累工程经验。

4.2.17 由于采用复合地基的建筑物沉降观测资料较少，一直沿用天然地基的沉降计算经验系数。现行《建筑地基基础设计规范》GB 50007 根据对 132 栋建筑物的资料

进行沉降计算并于资料值进行对比得出沉降计算经验系数 ψ_s 与平均 E_s 之间的关系，取值时允许采用内插法。

5 施 工

5.1 施 工 准 备

5.1.2 预成孔深层水下夯实法处理地基前，必须具有场地工程地质勘察报告、地下管线埋置情况、周边建筑物状况以及工程设计图纸、施工组织设计、施工工艺参数标准等。正式工程施工前，还应具备相关的试验资料及当地的类似地基处理工程经验资料等。

5.1.3 成孔方式应根据土层物理力学性能，择优选择旋挖成孔、冲击成孔、钢护筒护壁旋挖成孔等方法，或根据实际情况选择几种成孔方法混合使用。

5.1.5 工程正式开工时，应根据设计要求、设备选型、工艺标准和地基土层特征，先做工程设计检验的试验性施工。经设计确认后方可正式施工。

5.2 施 工 工 艺

5.2.2 在成孔过程中，应控制钻进和提钻速度，避免因钻进或提钻速度过快导致孔壁坍塌。另外应随时检查孔壁情况，如发现意外情况应立即停止成孔作业，并及时与设计沟通，采取适当处理措施以达到设计深度要求。

强夯前必须按成孔质量标准要求对已成孔的直径、垂直度、标高、孔内沉渣等进行检查，凡不符合成孔质量标准者，均需进项处理。

5.2.3 在地下水位界面及较松散、薄弱土层处，应适当减小填料分层厚度，并适当增加夯击数，充分进行振动、挤压，保证夯实效果。

夯击作业是预成孔深层水下夯实法的关键工序，强调“严格按照设计工艺规定的夯击能级、击数、遍数、填料量等要求施工，未经设计方、监理批准，任何人不得修改”，避免因工程管理对工艺和施工队伍的监督不到位造成质量问题。

强夯中必须检查夯锤是否与桩孔对中，是否呈自由落体状态，否则严禁填料强夯。

5.2.6 工程施工中，如发现异常必须由设计、监理人员予以解决，施工单位严禁自行处理。

6 质量控制与质量检测

6.1 质量控制

6.1.1 地基强度是通过原位测试和土工试验取得的力学强度指标；地基承载力可通过地基载荷试验直接测定，也可以通过试验指标计算得出。压缩模量是地基变形指标，可通过原位测试指标或室内土工试验指标计算确定，它与变形模量的换算关系为：

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}\right) E_s$$

E_0 ——土的变形模量（MPa）；

E_s ——土的压缩模量（MPa）；

μ ——土的泊松比。

6.1.2 开孔前应对孔位进行复核，防止因放线错误等原因造成孔位偏差过大。

6.1.3 在预成孔过程中应始终检查垂直度是否符合要求，如果垂直度偏差大，将影响孔内夯实效果。具体检查时可采用机械自带电子系统、垂直度检测仪或观察等方法。

6.1.4~6.1.5 夯作业前，应检查夯锤质量、落距，夯击时夯锤应严格对中成孔中心，使夯锤能自由落入孔底；以确保单击夯击能达到要求。

6.1.6 厚度填料的分层厚度应按要求严格控制，避免超填。

6.1.7 每孔施工完成后，应对总填料量进行核算应核算总填料量是否符合成桩质量要求，如不符合要求，应进行分析，必要时应采取补救措施。

6.1.8 满夯时，应按设计夯击数进行，不得偷锤、漏锤。另外，应重视搭接质量，发现漏夯区域及时补夯。

6.1.9 由于预成孔深层水下夯实法施工的特殊性，施工中的各项参数和步骤是否符合设计要求，在施工结束后往往很难检查。所以在施工过程中监测人员必须认真检查各项测试数据和施工记录，并对各项参数和施工情况进行详细记录。若不符合设计要求时，应及时采取有效措施。

6.2 质量检测

I 均质人工地基

6.2.2 经预成孔深层水下夯实法处理后的地基，强度随着时间的增长才能逐步提高。因此，施工结束后应根据地基土的性质，间隔一定时间后方可进行质量检测。

6.2.3、6.2.4 经预成孔深层水下夯实法处理后的地基，静载荷试验和其他原位测试、室内土工试验的检验点数量，主要根据场地复杂程度和建筑物的重要性确定。考虑到场地土的不均匀性和测试方法的误差，本规程规定了最小检测点数。此外，应考虑孔位夯实土与夯间土的差异性。面波测试作为评价地基均匀性的辅助手段，应与动力触探或标准贯入试验等原为测试结果验证后使用。

II 复合地基

6.2.6 由于成孔及成桩过程中，对原状土的结构产生了不同程度的扰动，强度会有所降低，饱和土地基在桩周围一定范围内，土的孔隙水压力上升。待放置一段时间后，孔隙水压力会消散，强度会逐渐恢复，恢复期的长短是由土的性质决定的。根据经验规定对渗透性良好的砂土与碎石土等地基，间隔时间应不少于为 7d，对粘性土等渗透性较差的地基，间隔时间宜为 14~28d。

6.2.7 标准贯入、静力触探、动力触探等方法可直接反映施工质量及桩、桩周土的挤密效果。对桩位布置的中心处的桩间土的进行检测，是因为此处挤密效果相对较差，如果满足要求，其他位置就会满足要求。另外可以进一步判断桩距的合理性。