

ICS 93.020

CCS P 22

DB 13

河北省地方标准

DB 13/T 5822—2023

夯扩挤密桩技术规程

地方标准信息服务平台

2023-10-25 发布

2023-11-25 实施

河北省市场监督管理局 发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由河北省水利厅提出并归口。

本文件起草单位：石家庄铁道大学、北京波森特岩土工程有限公司、河北正拓岩土工程有限公司。

本文件主要起草人：张力霆、王继忠、齐荣浩、张少雄、张授兴、杨启安、安喜坡、刘越、崔钉钉、徐彤、马嘉箴、张连喜、赵鹏程、王光亮、刘欣、王宇坤、李保琦、尹春播、佟敬时、张铭。

地方标准信息服务平台

夯扩挤密桩技术规程

1 范围

本文件规定了夯扩挤密桩的设计、复合地基设计、施工与验收等内容。
本文件适用于河北省范围内建设工程中夯扩挤密桩的设计、施工以及验收。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
GB 50007 建筑地基基础设计规范
GB 50010 混凝土结构设计规范
GB 50202 建筑地基基础工程施工质量验收规范
GB 51004 建筑地基基础工程施工规范
JGJ 6 高层建筑筏形与箱型基础技术规范
JGJ 79 建筑地基处理技术规范
JGJ 94 建筑桩基技术规范
JGJ 106 建筑基桩检测技术规范
JGJ/T 135 载体桩技术标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

夯扩挤密桩 rammed expansion and compaction pile
由桩身和承载体构成的桩。

3.2

承载体 bearing sphere
桩身以下经夯实形成的承载体。

3.3

挤密土体 compacted soil mass
夯实填充料或无填充料夯实时桩端周围被挤密的地基土体。

3.4

承载体填充料 bearing body filling material
一定质量比的水泥与其它填料加入一定量水拌合的干硬性材料。

3.5

夯扩挤密桩桩长 length of rammed expanded and compacted pile
桩身与承载体高度之和。

注：当承载体为无填料承载体时，承载体高度取0。

3.6

被加固土层 strengthened soil stratum
承载体所在的土层。

3.7

夯扩挤密桩的持力层 bearing layer of compacted and expanded pile

承载体以下直接承受承载体传递荷载的土层。

3.8

三次累计贯入度 the total penetrations of three drives

夯实后,以锤径为355 mm、质量为3500 kg的柱锤,落距6.0 m,连续三次锤击的累计下沉量。

3.9

等效计算面积 equivalent area

达到三次贯入度要求后,计算夯扩挤密桩承载力特征值的承载体等效承载面积。

3.10

夯扩挤密桩复合地基 rammed expansion and compaction pile composite foundation

以夯扩挤密桩作为地基中的竖向增强体并与地基土共同承担荷载的人工地基。

4 符号

4.1 作用和作用效应

F ——相应于作用的准永久组合时作用于承台顶的竖向力;

F' ——相应于作用的准永久组合时作用于承台梁上单位长度的竖向力;

F_k ——相应于作用的标准组合时承台顶面的竖向力;

N ——相应于作用的基本组合时夯扩挤密桩单桩竖向力设计值;

N_k ——相应于作用的标准组合时竖向力作用下,夯扩挤密桩基桩的平均竖向力;

N_{kz} ——相应于地震作用和荷载标准组合时夯扩挤密桩基桩的平均竖向力;

N_{kmax} ——相应于地震作用和荷载标准组合时夯扩挤密桩基桩的最大竖向力;

N_{kmax} ——相应于作用的标准组合时偏心竖向力作用下,夯扩挤密桩基桩的最大竖向力;

N_p ——相应于作用的基本组合时桩顶的拉力;

N_{pk} ——相应于作用的标准组合时桩顶的拉力;

P_0 ——相应于作用的准永久组合时桩端平面的附加压力;

σ_s ——相应于作用的标准组合时作用于软弱下卧层顶面的附加应力;

σ_{zt} ——相应于作用的标准组合时按等代实体计算的作用于夯扩挤密桩桩底的地基土平均附加应力。

4.2 抗力和材料性能

E_{sk} ——持力层的地基土压缩模量;

E_{s2} ——软弱下卧层地基土压缩模量;

E_{si} ——桩端平面下第*i*层土在自重压力至自重压力加附加压力作用段的压缩模量;

e ——土的孔隙比;

f_a ——经修正后的夯扩挤密桩持力土层承载力特征值;

f_{ak} ——天然地基承载力特征值;

f_{a2} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后地基承载力特征值;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值;

f_{rk} ——岩石单轴饱和抗压强度标准值;

f_{spk} ——夯扩挤密桩复合地基承载力特征值;

f_y ——纵向主筋抗压强度设计值;

f_y ——纵向主筋抗拉强度设计值;

G_{sp} ——群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数的平均重量,地下水以下扣除浮力;

G_k ——夯扩挤密桩基承台和其上部土的自重标准值,对于稳定的地下水位以下部分应扣除水的浮力;

G'_k ——单位长度梁及其上部土的自重标准值;

G_p ——基桩自重;

I_L ——土的液性指数;

Q_{sk} ——扩挤密桩单桩竖向受压极限承载力标准值;

Q_{sik} ——第*i*层土极限侧阻力标准值;

R_a ——夯扩挤密桩单桩竖向受压承载力特征值;

T_{sk} ——群桩呈整体破坏时基桩的受拔极限承载力标准值；
 T_{sk} ——群桩呈非整体破坏时基桩的受拔极限承载力标准值；
 γ ——承台底以上土的加权平均重度，地下水以下采用浮重度；
 γ_n ——软弱下卧层顶面以上土的加权平均重度，地下水以下采用浮重度；
 γ_n ——桩底以上地基土的加权平均重度；
 θ ——压力扩散角；
 φ ——桩身穿过土层的等效内摩擦角。

4.3 几何参数

A ——承台面积；
 A_c ——承载体等效计算面积；
 A_p ——桩身截面面积；
 A_s ——纵向主筋截面面积；
 B_0 ——桩群外缘矩形底面的短边边长；
 D ——抗拔承载力计算的等效直径；
 d ——混凝土桩身直径；
 d_0 ——承载体填充料换算成球体的等效直径；
 d_s ——承台埋深；
 L_0 ——桩群外缘矩形底面的长边边长；
 l ——直杆段混凝土桩身长度；
 l_i ——桩长范围内第*i*层土的厚度；
 s ——桩基最终沉降量；
 t ——承载体底面计算位置至软弱层顶面的距离；
 u_r ——桩身抗拔破坏面的周长；
 u_r ——群桩抗拔破坏时外缘矩形截面周长；
 z ——地面至软弱下卧层顶面的距离；
 Z_0 ——地面至夯扩挤密桩底的距离；
 $\Delta s'_i$ ——在计算深度范围内，第*i*层土的计算变形量；
 $\Delta s'_n$ ——由计算深度位置向上取厚度为 Δz_n 的土层计算变形量；
 ΔR ——扩散等效计算宽度；
 ΔS ——夯扩挤密桩受拔承载力计算时的计算半径增量。

4.4 计算系数

K ——安全系数；
 m ——夯扩挤密桩复合地基面积置换率；
 n ——桩端平面下压缩层范围所划分的土层总数；
 n_p ——承台下基桩桩数；
 α ——地基土承载力提高系数；
 $\bar{\alpha}$ ——桩端平面下土的平均附加应力系数；
 β ——考虑施工挤土后桩侧阻力的提高系数；
 λ_r ——侧阻力抗拔折减系数；
 λ_s ——复合地基单桩竖向承载力的发挥系数；
 λ_s ——桩间土承载力的发挥系数；
 ψ_c ——成桩工艺系数；
 ψ_p ——沉降计算经验系数；
 ψ_r ——折减系数。

5 总体要求

- 5.1 黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、全风化岩、强风化岩及中风化岩可作为夯扩挤密桩的持力层。对淤泥、淤泥质土、有机等特殊土地基，应通过成桩试验、载荷试验确定其适用性。
- 5.2 黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土等土层可选作夯扩挤密桩的被加固土层。当选用软塑—可塑状态的黏性土、素填土、杂填土、湿陷性土作为被加固土层时应通过成桩试验、载荷试验确定其适用性。
- 5.3 应根据地质条件、上部荷载、施工工艺与设备及在类似条件下的工程经验等因素综合确定夯扩挤密桩设计参数。
- 5.4 施工前应确定承载体填料的配合比，且填充料中水泥和其它填充料的质量比不小于 1:3，拌合时加入适量的水，确保拌合物强度达到设计要求且便于施工。桩径为 300 mm~500 mm 的夯扩挤密桩，填料量不宜大于 0.8 m³，填料粒径应小于施工孔径的 1/3；桩径为 500 mm~800 mm 的夯扩挤密桩，填料量不宜大于 1.2 m³。当填料量超过限值时，应调整被加固土层。
- 5.5 夯扩挤密桩设计时应进行单桩和群桩承载力验算，群桩承载力可按等代实体基础进行验算。
- 5.6 桩身可采用现浇混凝土和混凝土预制构件，当地下水或土对混凝土或混凝土中的钢筋有腐蚀性时，桩身材料应满足抗腐蚀要求。
- 5.7 夯扩挤密桩施工可采用锤击跟管、振动沉管、静压、旋挖、液压锤、潜孔锤等成孔施工工艺。
- 5.8 夯扩挤密桩施工时，应控制相邻桩的上浮量。对于桩身混凝土已达到终凝的相邻桩，其上浮量不应大于 20 mm；对于桩身混凝土处于流动状态的相邻桩，其上浮量不应大于 50 mm。
- 5.9 在地下水位以下的砂土、卵石、砾石等渗透系数较大的土中施工夯扩挤密桩时，应注意采取封水措施。当桩端进入具有承压水的土层时，施工中应考虑承压水对施工的影响。
- 5.10 夯扩挤密桩施工采用全自动电脑控制施工时，施工前应根据地基土土质特性设定适宜的施工控制参数，并全程记录施工过程中各项控制指标。
- 5.11 对满堂布置的夯扩挤密桩施工，宜进行地基土水平和垂直方向位移的监测工作。
- 5.12 夯扩挤密桩施工后进行基坑开挖时，应认真做好基坑支护和开挖施工，并考虑基坑开挖时边坡土体的侧移及坑底隆起对工程桩的影响。

6 夯扩挤密桩设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 夯扩挤密桩的设计等级应按 JGJ 94 执行。
- 6.1.2 夯扩挤密桩设计时所采用的作用组合和抗力限值应符合 GB 50007 的规定。
- 6.1.3 夯扩挤密桩桩间距不宜小于 3 倍桩身直径，当被加固土层为含水率大于 20% 的黏性土时，桩间距不宜小于 4 倍桩身直径；施工时不得影响相邻桩的施工质量；当被加固土层为粉土、砂土或碎石土时，桩间距不宜小于 1.6 m，当被加固土层为含水率大于 20 % 的黏性土时，桩间距不宜小于 2.0 m。

6.2 竖向受压承载力计算

6.2.1 夯扩挤密桩竖向受压承载力。

6.2.1.1 作用标准组合应符合下列规定：

- a) 轴心竖向力作用下应符合公式(1)的要求：

$$N_k \leq R_a \dots\dots\dots (1)$$

式中：

N_k ——相应于作用的标准组合时竖向力作用下，夯扩挤密桩基桩的平均竖向力(kN)；

R_a ——夯扩挤密桩单桩竖向受压承载力特征值(kN)。

- b) 偏心竖向力作用下除应满足公式(1)外，尚应满足公式(2)的要求：

$$N_{k\max} \leq 1.2R_a \dots\dots\dots (2)$$

式中:

N_{Ekmax} ——相应于作用的标准组合时偏心竖向力作用下, 夯扩挤密桩基桩的最大竖向力(kN)。

6.2.1.2 地震作用和荷载标准组合应符合下列规定:

a) 轴心竖向力作用下应符合公式(3)的要求:

$$N_{Ek} \leq 1.25R_a \quad (3)$$

式中:

N_{Ek} ——相应于地震作用和荷载标准组合时夯扩挤密桩基桩的平均竖向力(kN)。

c) 偏心竖向力作用下除应满足公式(3)外, 尚应满足公式(4)的要求:

$$N_{Ekmax} \leq 1.5R_a \quad (4)$$

式中:

N_{Ekmax} ——相应于地震作用和荷载标准组合时夯扩挤密桩基桩的最大竖向力(kN)。

6.2.2 夯扩挤密桩单桩竖向受压承载力特征值的确定。

6.2.2.1 桩基设计等级为甲级和地质条件复杂的乙级夯扩挤密桩基础, 应通过单桩竖向静载荷试验确定单桩竖向受压承载力特征值。同一条件下试验数量不应少于3根。

6.2.2.2 夯扩挤密桩单桩竖向受压承载力特征值应按公式(5)计算:

$$R_a = Q_{uk} / K \quad (5)$$

式中:

Q_{uk} ——夯扩挤密桩单桩竖向受压极限承载力标准值(kN);

K ——安全系数, 取 $K=2$ 。

6.2.3 对于桩长小于30m的夯扩挤密桩, 单桩竖向受压承载力特征值的计算。

6.2.3.1 桩身范围内无液化土层时, 可采用公式(6)估算:

$$R_a = f_a \cdot A_e \quad (6)$$

式中:

f_a ——经修正后的夯扩挤密桩持力土层承载力特征值(kPa), 承载力修正应按GB 50007执行, 其中宽度修正系数为零;

A_e ——夯扩体等效计算面积 m^2 (宜按河北省地区经验确定, 无地区经验且桩径为450mm~500mm时可按表1选取。当桩径为350mm~450mm时, 表中 A_e 值应乘以0.85~0.95, 当桩径为500mm~800mm时, 表中 A_e 值应乘以1.1~1.3, 桩径小时取小值, 桩径大时取大值)。

6.2.3.2 桩身范围内无液化土层时, 可采用公式(7)估算:

$$f_a = \psi_r f_{rk} \quad (7)$$

式中:

f_{rk} ——岩石单轴饱和抗压强度标准值(kPa);

ψ_r ——折减系数, 根据地方经验确定。

6.2.3.3 当桩身穿过液化土层时, 应考虑液化对单桩承载力的影响, 计算应按JGJ 94执行。

表1 承载体等效计算面积

单位为厘米

被加固土层土性		三次贯入度 (cm)				
		<10	10	20	30	>30
黏性土	$0.75 < I_L \leq 1.00$	—	2.2~2.5	1.8~2.2	1.5~1.8	<1.5
	$0.25 < I_L \leq 0.75$	—	2.5~2.8	2.2~2.5	1.9~2.2	<1.9
	$0.00 < I_L \leq 0.25$	3.2~3.6	2.8~3.2	2.4~2.8	2.1~2.4	<2.1
杂填土		2.6~3.0	2.3~2.6	2.0~2.3	1.7~2.0	<1.7

表1 承载体等效计算面积(续)

单位为厘米

被加固土层土性		三次贯入度 (cm)				
		<10	10	20	30	>30
粉土	$e > 0.8$	2.6~2.9	2.3~2.6	2.0~2.3	1.7~2.0	<1.7
	$0.7 < e \leq 0.8$	3.0~3.3	2.7~3.0	2.4~2.7	2.1~2.4	<2.1
粉土	$e \leq 0.7$	3.3~3.7	2.9~3.3	2.5~2.9	2.2~2.5	<2.2
粉砂、 细砂	松散-稍密	3.2~3.6	2.8~3.2	2.4~2.8	2.1~2.4	<2.1
	中密-密实	3.7~4.2	3.2~3.7	2.7~3.2	2.3~2.7	<2.3
中砂、 粗砂	松散-稍密	3.6~4.1	3.1~3.6	2.6~3.1	2.2~2.6	<2.2
	中密-密实	4.3~4.8	3.8~4.3	3.3~3.8	2.8~3.3	—
碎石土	松散-稍密	3.9~4.5	3.4~3.9	2.9~3.4	—	—
	中密-密实	4.6~5.2	4.0~4.6	3.4~4.0	—	—
残积土		3.8~4.2	3.4~3.8	3.0~3.4	—	—
全风化岩		4.0~4.4	3.6~4.0	3.2~3.6	—	—
强风化岩		4.4~4.9	4.0~4.4	—	—	—

注：表中 e 为土的孔隙比； I_L 为土的液性指数。

6.2.4 夯扩挤密桩单桩承载力除应按 5.2.3 估算外，尚应进行正截面受压承载力的验算。

6.2.4.1 当桩顶以下 5 倍桩身直径范围内的螺旋式箍筋间距不大于 100 mm 时，应符合公式 (8) 要求：

$$N \leq \psi_c f_c A_p + 0.9 f_y' A_s \quad (8)$$

式中：

N ——相应于作用基本组合时夯扩挤密桩单桩桩顶竖向力设计值 (kN)；

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值 (kPa)，应符合 GB 50010 的规定；

f_y' ——纵向主筋抗压强度设计值 (kPa)；

A_s ——纵向主筋截面面积 (mm²)；

A_p ——桩身截面面积 (mm²)；

ψ_c ——成桩工艺系数，桩身为预制混凝土构件时取 0.85，现场灌注时取 0.75~0.90，桩身挤土效应明显时取低值，挤土效应不明显时取高值，桩身外侧有水泥土桩时取高值。

6.2.4.2 当桩顶以下 5 倍桩身直径范围内的螺旋式箍筋间距大于 100 mm 时，应符合公式 (9) 要求：

$$N \leq \psi_c f_c A_p \quad (9)$$

6.2.5 当桩间距小于 6 倍桩身直径，夯扩挤密桩群桩基础持力层下受力范围内存在软弱下卧层时，应按公式 (10)、(11) 进行软弱下卧层承载力验算：

$$\sigma_z + \gamma_m z \leq f_{ac} \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{F_k + G_k - \gamma A d_h - \frac{3}{2} (L_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{(L_0 + 2\Delta R + 2t \cdot \tan \theta) (B_0 + 2\Delta R + 2t \cdot \tan \theta)} \dots\dots\dots (11)$$

- 式中：
- σ_z ——相应于作用的标准组合时软弱下卧层顶面的附加应力（kPa）；
 - γ ——承台底以上土的加权平均重度（kN/m³）地下水以下采用浮重度；
 - z ——地面至软弱下卧层顶面的距离（m）；
 - d_h ——承台埋深（m）；
 - A ——承台面积（m²）；
 - γ_s ——软弱下卧层顶面以上土的加权平均重度，地下水以下采用浮重度（kN/m³）；
 - q_{sik} ——第*i*层土极限侧阻力标准值（kPa），根据经验确定或按JGJ 94 执行；
 - l_i ——桩长范围内第*i*层土的厚度（m）；
 - t ——承载体底面计算位置至软弱层顶面的距离（m）；
 - f_{sz} ——软弱下卧层顶面处经深度修正后地基承载力特征值（kPa）；
 - F_k ——相应于作用的标准组合时承台顶面的竖向力（kN）；
 - G_k ——夯扩挤密桩基承台和其上部土自重标准值，对于稳定的地下水位以下部分应扣除水的浮力（kN）；
 - $L_0、B_0$ ——桩群外缘矩形底面的长、短边边长（m）（图1）；
 - ΔR ——扩散等效计算宽度（m），可取0.6 m~1.0 m，当 L_0 值较小时，取小值；当 L_0 值较大时，取大值；
 - θ ——压力扩散角（°），可按表2取值。

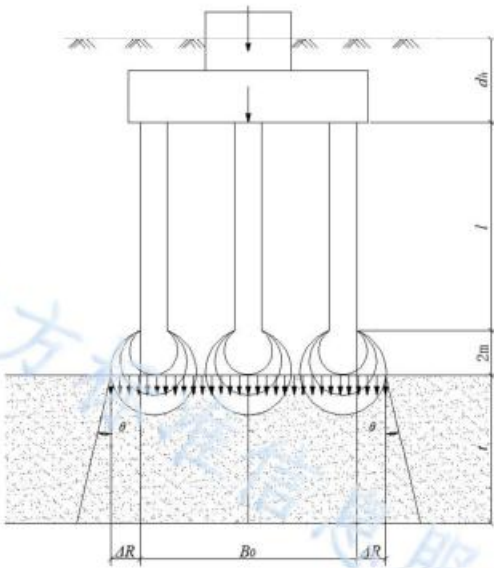


图1 软弱下卧层计算示意（*l*—直杆段混凝土桩身长度）

表2 地基压力扩散角

E_{s1}/E_{s2}	t/B_0	
	0.25	0.50
1	4°	12°

表2 地基压力扩散角(续)

E_{s1}/E_{s2}	t/B_0	
	0.25	0.25
3	6°	23°
5	10°	25°
10	20°	30°
注 1: $B_0=B_0+2\Delta R$; 注 2: E_{s1} 、 E_{s2} 分别为持力层和软弱下卧层的地基土压缩模量; 注 3: t/B_0 小于 0.25 时取 0°, 大于 0.25 且小于 0.5 时按内插取值, 大于 0.50 时取 0.50 对应的扩散角。		

6.2.6 对于独立柱基和满堂布桩的基础, 应按公式(12)、公式(13)进行群桩整体基础承载力验算:

$$\sigma_{zd} + \gamma_n z_d \leq f_a \quad \text{..... (12)}$$

$$\sigma_{zd} = \frac{F_k + G_k - \gamma A d_h - \frac{3}{2}(L_0 + B_0) \sum q_{sik} l_i}{(L_0 + 2\Delta R)(B_0 + 2\Delta R)} \quad \text{..... (13)}$$

式中:
 σ_{zd} ——相应于作用的标准组合时按等代实体计算的作用于夯扩挤密桩桩底的地基土平均附加应力(kPa)
 γ_n ——桩底以上地基土的加权平均重度(kN/m³);
 z_d ——地面至夯扩挤密桩底的距离(m)。

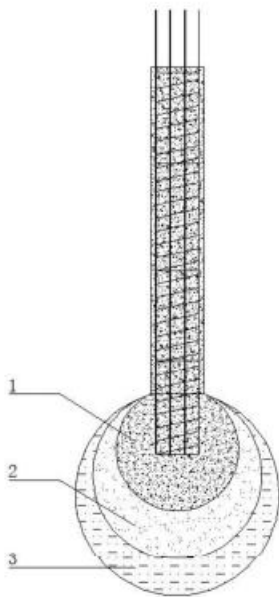
6.3 受拔承载力计算

6.3.1 抗拔夯扩挤密桩应将钢筋笼(锚杆)嵌入承载体内部(图2), 并按公式(14)、公式(15)验算群桩基础呈整体破坏和呈非整体破坏时基桩的受拔承载力:

$$N_{pk} \leq \frac{T_{zk}}{2} + G_{gp} \quad \text{..... (14)}$$

$$N_{pk} \leq \frac{T_{nk}}{2} + G_p \quad \text{..... (15)}$$

式中:
 N_{pk} ——相应于作用的标准组合时桩顶的拉力(kN);
 T_{zk} ——群桩呈整体破坏时基桩的受拔极限承载力标准值(kN), 可按5.3.2确定;
 T_{nk} ——群桩呈非整体破坏时基桩的受拔极限承载力标准值(kN), 可按5.3.2确定;
 G_{gp} ——群桩基础所包围体积的桩土总自重除以总桩数的平均重量(kN), 地下水以下扣除水的浮力;
 G_p ——基桩自重(kN), 地下水位以下扣除水的浮力。



标引序号说明：
1——承载体填充料；
2——挤密土体；
3——影响土体。

图2 抗拔夯扩挤密桩的构造

- 6.3.2 夯扩挤密桩基桩及群桩的受拔极限承载力的确定。
- 6.3.2.1 对于设计等级为甲级和乙级的夯扩挤密桩基，基桩的受拔极限承载力应通过现场单桩抗拔静载荷试验确定。单桩抗拔静载荷试验方法及受拔极限承载力标准值取值可按 JGJ 106 执行。
- 6.3.2.2 如无当地经验，群桩基础及设计等级为丙级的建筑桩基，基桩的受拔极限承载力计算时，计算位置应从纵向钢筋底开始，并可按下列规定确定：
- a) 群桩呈非整体破坏时，基桩的受拔极限承载力标准值可按公式（16）计算：
- $$T_{uk} = \sum \beta \lambda_i q_{sik} u_i l_i \dots\dots\dots (16)$$
- 式中：
- u_i ——桩身抗拔破坏面的周长（m），按表3取值（图3）；
- λ_i ——侧阻力抗拔折减系数，砂土取0.55~0.75，黏性土和粉土取0.75~0.85；
- β ——考虑施工挤土后桩侧阻力的提高系数，宜取1.05~1.15。

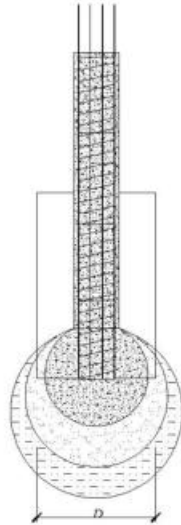


图3 抗拔夯扩挤密桩计算简图

表3 夯扩挤密桩抗拔破坏面周长取值

自纵向钢筋底以上的计算深度	$\leq (4 \sim 10) d$	$> (4 \sim 10) d$
u_i	πD	πd
注1：表中计算深度对于软土取低值，对于卵石、砾石取高值。 注2：D为受拔承载力计算的等效直径（m）。 $D=d+2\Delta S$ 。其中， d_0 为承载体填充料换算成球体的等效直径（m）； ΔS 为夯扩挤密桩受拔承载力计算时的计算半径增量（m）。 ΔS 取值为0.3 m~0.5 m，填料多、三次贯入度小时取大值，填料少、三次贯入度大时取小值。		

b) 群桩呈整体破坏时，夯扩挤密桩基桩的受拔极限承载力标准值可按公式（17）计算：

$$T_{gk} = \frac{1}{n_p} \beta u_i \sum \lambda_i q_{sik} l_i \dots\dots\dots (17)$$

式中：

u_i ——群桩抗拔破坏时外缘矩形截面周长（m）；

n_p ——承台下基桩桩数。

6.3.3 抗拔夯扩挤密桩正截面受拉承载力应按公式（18）进行验算：

$$N_p \leq f_y A_s \dots\dots\dots (18)$$

式中：

N_p ——相应于作用的基本组合时桩顶拉力（kN）；

f_y ——纵向主筋抗拉强度设计值（kPa）；

A_s ——纵向主筋截面面积（mm²）。

6.4 沉降计算

6.4.1 对于下列情况的夯扩挤密桩基应进行沉降计算：

- a) 设计等级为甲级的夯扩挤密桩基；
- b) 设计等级为乙级的体型复杂、荷载分布显著不均匀或桩端平面以下存在高压缩性土层的夯扩挤密桩基；
- c) 地基条件复杂、对沉降要求严格的其他夯扩挤密桩基。

6.4.2 夯扩挤密桩基沉降变形计算值不应大于建筑桩基沉降变形允许值，桩基沉降变形允许值应符合 JGJ 94 的规定。

6.4.3 夯扩挤密桩沉降计算宜按等代实体深基础的单向压缩分层总和法进行计算，地基内的应力宜采用各向同性匀质弹性体变形理论，按实体深基础进行计算，沉降计算起始位置为桩身底面以下 2 m（图 4）。

6.4.4 桩基最终沉降量应按公式（19）计算：

$$s = \psi_p p_0 \sum_{i=1}^n \frac{z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}}{E_{si}} \quad (19)$$

式中：

s ——桩基最终沉降量（mm）；

p_0 ——相应于作用准永久组合时桩端平面的附加压力（kPa）；

ψ_p ——沉降计算经验系数，根据地区沉降观测资料及经验确定；当没有经验时，可按 GB 50007 执行；

z_i 、 z_{i-1} ——沉降计算时桩端面到第 i 层、第 $i-1$ 层土底面的距离（m）；

$\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ ——桩端平面下至第 i 层、第 $i-1$ 层土底面范围内的平均附加应力系数，可按 GB 50007 执行；

n ——桩端平面下压缩层范围内土层总数；

E_{si} ——桩端平面下第 i 层土在自重压力至自重压力加附加压力作用段的压缩模量（MPa）。

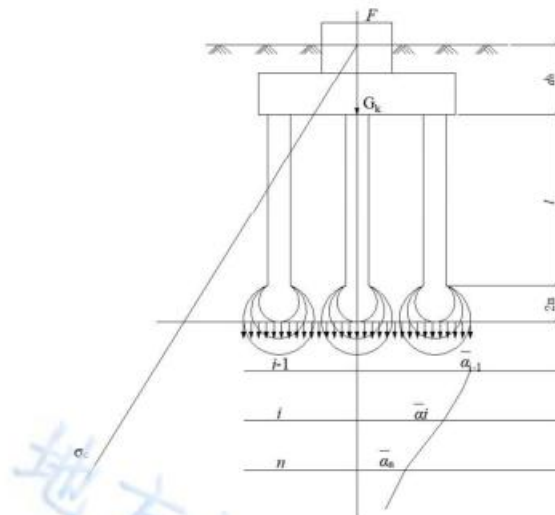


图 4 沉降计算示意图（ d —承台埋深； l —直杆段混凝土桩身长度； σ_s —土地自重压应力）

6.4.5 桩基最终沉降量应按公式（20）、公式（21）计算：

a) 对于独立承台基础：

$$p_0 = \frac{F + G_k - \gamma d_b A}{\left[L_0 + 2(l+2) \cdot \tan \frac{\varphi}{4} \right] \left[B_0 + 2(L+2) \cdot \tan \frac{\varphi}{4} \right]} \quad (20)$$

b) 对于墙下布桩条形承台梁基础：

$$p_0 = \frac{F' + G'_k - \gamma d_b B_0}{B_0 + 2(l+2) \cdot \tan \frac{\varphi}{4}} \quad (21)$$

式中：

φ ——桩身穿过土层的等效内摩擦角（°）；

F ——相应于作用的准永久组合时作用于承台顶的竖向力（kN）；

F' ——相应于作用的准永久组合时作用于承台梁上单位长度的竖向力（kN/m）；

G_k ——单位长度梁及其上土的自重标准值 (kN/m)。

c) 当公式 (20) 和公式 (21) 中 $2(l+2) \cdot \tan \frac{\varphi}{4}$ 小于 $2AR$ 时, 按 $2AR$ 取值。

6.4.6 夯扩挤密桩基沉降计算深度应符合下式规定:

$$\Delta s'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta s'_i \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$\Delta s'_i$ ——在计算深度范围内, 第 i 层土的计算变形值 (mm);

$\Delta s'_n$ ——由计算深度位置向上取厚度为 Δz_n 的土层计算变形值 (mm), Δz_n 可按 GB 50007 执行。

6.5 构造

6.5.1 现场灌注夯扩挤密桩基桩身混凝土强度等级不应低于 C25, 预制夯扩挤密桩基桩身混凝土强度等级不应低于 C30。

6.5.2 夯扩挤密桩主筋混凝土保护层厚度不应小于 35 mm, 且应满足耐久性要求。

6.5.3 夯扩挤密桩基桩身配筋应符合下列规定:

- a) 桩身应通长配筋;
- b) 桩身配筋率宜取 0.2%~0.5%, 小直径桩取大值, 大直径桩取小值。对于承受荷载特别大的夯扩挤密桩、抗拔夯扩挤密桩, 桩身配筋尚应满足设计要求;
- c) 抗拔桩的主筋应伸入承载体内, 进入承载体长度不应小于 20 倍纵向主筋直径, 且不应小于 50 cm。

7 夯扩挤密桩复合地基设计

7.1 一般规定

7.1.1 夯扩挤密桩复合地基可适用于处理黏性土、粉土、砂土和自重固结完成的不含生活垃圾的填土地基。对于其他地基土应按地区经验或通过现场试验确定其适用性。

7.1.2 夯扩挤密桩复合地基增强体应选择中、低压缩性土为持力层。

7.2 复合地基设计

7.2.1 复合地基中增强体桩径宜为 400 mm~600 mm。当复合地基桩间距大于 2 m 时, 宜在距桩顶 1 倍桩径范围扩径。

7.2.2 夯扩挤密桩复合地基的桩间距应根据设计要求的复合地基承载力、地层土性、桩径、施工工艺及布桩等因素综合确定, 桩距宜为 4~6 倍桩身直径, 满堂布桩时宜取高值。

7.2.3 夯扩挤密桩复合地基布桩宜按现行行业标准《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 中的有关规定执行。

7.2.4 夯扩挤密桩复合地基桩顶应设置褥垫层, 褥垫层应符合下列规定:

- a) 其材料宜为粗砂、级配砂石或碎石等, 最大粒径不宜大于 30 mm;
- b) 厚度应根据桩直径、桩顶构造、增强体承载力及桩间土承载力等因素综合确定, 宜为 0.5 倍桩顶直径。

7.2.5 夯扩挤密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, 初步设计时可按公式 (23) 估算:

$$f_{spk} = \lambda_z \frac{R_a}{A_p} + \alpha \lambda_s (1-m) f_{ak} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

f_{spk} ——夯扩挤密桩复合地基承载力特征值 (kPa);

λ_z ——复合地基增强体竖向承载力发挥系数, 按地区经验确定, 无经验时可取 0.80~0.95;

R_a ——夯扩挤密桩增强体的承载力特征值 (kN), 按本标准第 5.2 节确定;

λ_s ——桩间土承载力的发挥系数, 按地区经验确定, 无经验时可取 0.85~0.95;

α ——地基土承载力提高系数，按地区经验确定，无经验时可取1.1~1.3，砂土、粉土取高值，黏性土取低值；

m ——夯扩挤密桩复合地基面积置换率， m 的计算应按JGJ 79执行；

f_{ak} ——天然地基承载力特征值（kPa）。

7.2.6 夯扩挤密桩复合地基增强体桩身强度验算应按 JGJ 79 执行。

7.2.7 夯扩挤密桩复合地基变形计算应按 JGJ 79 执行。

8 施工

8.1 一般规定

8.1.1 夯扩挤密桩施工前的准备，应符合下列规定：

- 通过查阅建筑场地和邻近区域内原有构筑物和地下管线分布资料、现场踏勘等进行施工环境调查，对存在影响施工的建筑、管线、地下构筑物等应进行勘察，并应会同有关单位采取相应保护措施；
- 依据岩土工程勘察报告、桩基设计文件及现场施工条件等，结合工程经验，确定施工工艺和设备，并编制施工方案；
- 进行施工图会审和设计交底；
- 对主要施工机械及其配套设备进行性能和运行安全检查；
- 对拟用的混凝土、钢筋、构件等原材料进行见证检验；
- 进行工艺试验施工，并根据施工结果调整工程桩的施工工艺。

8.1.2 施工前应进行设备的调平，避免施工中桩机倾斜过大导致施工安全事故。

8.1.3 施成桩过程中应结合地质情况、桩间距及桩长，合理安排施工顺序。施工顺序应本着减少影响邻桩质量的原则，并应符合下列规定：

- a) 应有利于保护已施工桩不受损坏；
- b) 应根据施工情况确定施工顺序；
- c) 持力层埋深不一致时，应按先浅后深的顺序进行施工。

8.1.4 夯扩挤密桩施工可分为成孔、承载体施工和桩身施工三部分（图5）。成孔可采用锤击跟管、振动锤、液压锤、柴油锤、潜孔锤等沉管方式，也可采用旋挖、长螺旋等辅助引孔方式成孔。

地方标准信息服务平台

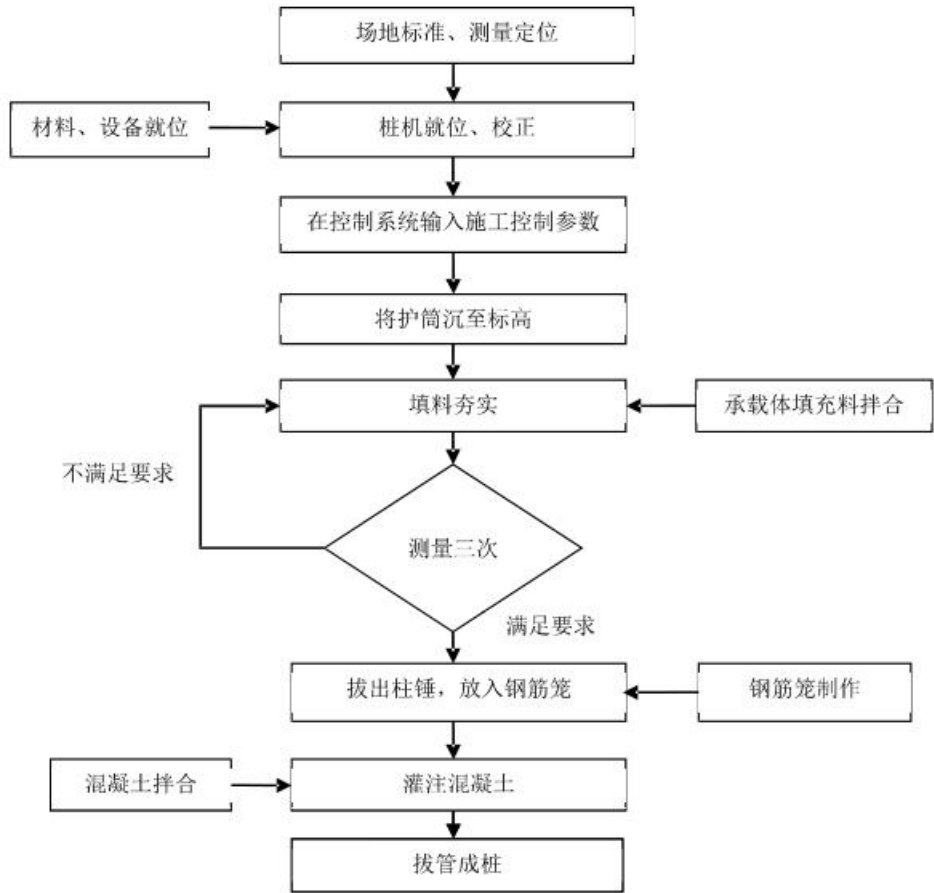


图5 夯扩挤密桩施工工艺

8.1.5 抗拔夯扩挤密桩的施工工艺如图 6 所示。

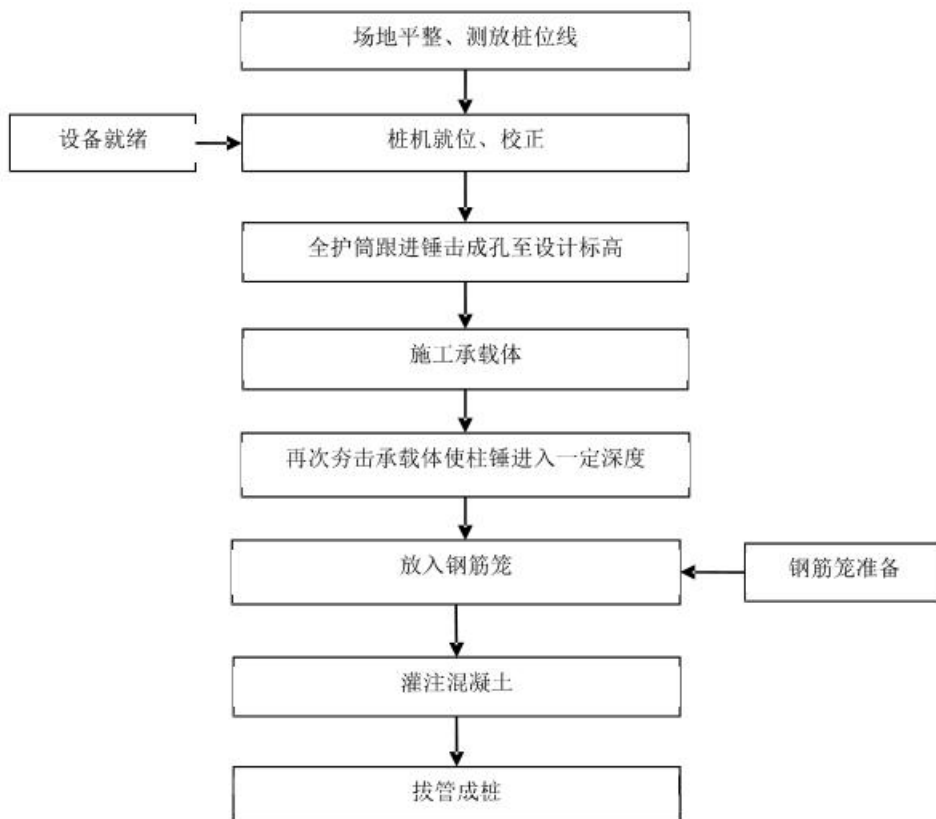


图6 抗拔夯扩挤密桩施工工艺

8.1.6 承载体施工宜采用计算机自动控制系统，通过输入施工参数自动控制每次夯击时锤的提升高度，自动记录每次夯击的贯入度和最终三次贯入度。

8.1.7 当在饱和黏土中施工时，应满足下列要求：

- a) 桩锤锤底出护筒的距离不应超过 5 cm；
- b) 施工中测完三次贯入度后，应检查桩端土体是否回弹。当土体回弹量超过 5 cm 时，应分析原因，处理后重新测量。

8.1.8 在地下水位以下施工时，应采取有效的封堵措施。

8.1.9 抗拔夯扩挤密桩施工时，经测量三次贯入度满足要求后，应再次沉护筒至承载体内，深度应满足抗拔构造要求且不得小于 50 cm，随后方可放置钢筋笼，浇筑混凝土成桩。

8.2 锤击跟管夯扩挤密桩施工

8.2.1 锤击跟管夯扩挤密桩施工是指利用柱锤自由落体的重力势能夯击地基土成孔，利用卷扬将护筒反压入土中跟进，反复进行，最终到设计标高，然后再施工承载体和桩身的夯扩挤密桩施工技术。

8.2.2 锤击跟管夯扩挤密桩施工适用于黏性土、粉土和松散砂土，当桩身范围内存在密实砂土或卵石等成孔困难的土时，可采用长螺旋、旋挖、潜孔锤、液压锤等引孔工艺，穿透密实土层配合施工。

8.2.3 锤击跟管夯扩挤密桩施工设备包括底座、龙门架、柱锤、护筒、主副卷扬、自动控制系统以及配套设备。

8.2.4 施工中应根据夯扩挤密桩的设计参数、地基土的土性选择匹配的护筒、柱锤等配件，在自动控制系统中设定适合的施工参数。

8.2.5 锤击跟管夯扩挤密桩施工工艺如图 7。

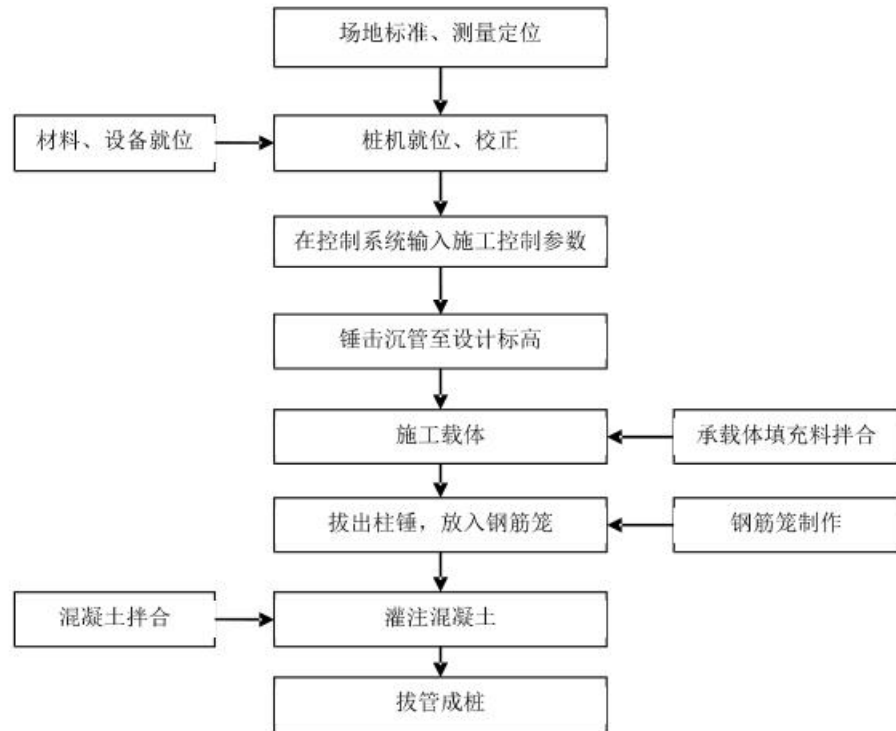


图7 锤击跟管夯扩挤密桩施工工艺

8.2.6 锤击跟管夯扩挤密桩施工质量控制应符合以下要求：

- 在含水率高的黏性土中施工应严格控制柱锤出护筒的距离，一般不超过 5 cm，减少柱锤对土的扰动；
- 在含水率高的黏性土中测完三次贯入度后，应检查桩端土体是否回弹，避免桩端地基土隆起后影响施工质量；
- 填料夯实过程中应检查护筒底的渗水情况，并根据需要采取一定的封堵措施。

8.3 振动沉管夯扩挤密桩施工

8.3.1 振动沉管夯扩挤密桩施工是指利用振动沉管设备将护筒沉到桩底设计标高，然后再进行承载体和桩身施工的夯扩挤密桩施工方法。

8.3.2 振动沉管夯扩挤密桩施工工艺适合于桩身为淤泥、粉土、粘性土、松散砂土的夯扩挤密桩施工。

8.3.3 振动沉管夯扩挤密桩施工设备包括：桩架、底盘、动力头、护筒、卷扬、柱锤、自动控制系统和配套设备。

8.3.4 施工中应根据地基土土性和桩的参数，选择与之相匹配功率的动力头和护筒。

8.3.5 振动沉管夯扩挤密桩施工工艺如下：

- 制作桩尖。提前预制好与护筒直径相匹配的桩尖；
- 就位。桩机就位后吊起护筒放置预制桩尖，并利用草绳垫或塑料膜密封桩尖和护筒底之间的孔隙；
- 沉管。开动振动箱，将护筒沉入地基土中到设计标高；
- 施工载体。开启自动控制系统，填料夯实，测量三次贯入度，施工载体；
- 施工桩身。放置钢筋笼，浇筑混凝土，或直接放入预制构件；
- 拔管。开动振动箱拔出护筒。

8.3.6 振动沉管夯扩挤密桩施工工艺如下：

- a) 护筒、混凝土桩尖或钢桩尖的加工质量应符合设计要求，护筒与桩尖的接触面应平整且具有良好的密封性；
 - b) 沉管前应调整好设备，使护筒中心、桩尖在同一垂线上；
 - c) 沉管过程中若发现护筒内进水或泥浆，应拔出护筒重新处理使护筒底与桩尖密封；
 - d) 必须严格控制最后 30 s 的电流，电压值，其值可按设计要求或根据试桩和当地经验确定；
 - e) 承载体施工完毕后应立即放置钢筋笼、浇筑混凝土，并拔出护筒；
 - f) 拔管速度应根据地基土层确定，在软土中宜控制 0.6~0.8m/min，一般土中应控制 1.2~1.5 m/min；
 - g) 拔管过程中，桩管内的混凝土至少保持不少于 2 m，并保证桩顶混凝土超灌不少于 0.5 m。
- 8.3.7 振动沉管夯扩挤密桩施工的混凝土充盈系数不应小于 1.0，当充盈系数过大时应分析原因，并采取一定的控制措施。

8.4 静压夯扩挤密桩施工

- 8.4.1 静压夯扩挤密桩施工适合桩身范围为淤泥、黏性土和粉土等适合静压成孔的地层。
- 8.4.2 静压夯扩挤密桩施工前必须进行如下准备工作：
- a) 平整及处理场地，达到地面平整、排水通畅、坡度不大于 2%，对不适合压桩机正常运行的松软场地应进行处理，使场地的承压能力满足压桩机正常运行的要求；
 - b) 在不受施工影响的区域设置基桩轴线的控制点和水准基点，且做好明确标识并做好保护措施；
 - c) 编制施工组织设计或施工方案；
 - d) 根据桩基参数和地质条件选择合适的静压桩机型号，配重必须大于最大施工加压的 1.2 倍。
- 8.4.3 静压桩机设备采用液压式静压桩机，为方便施工，采用中置式或前置式液压桩机。压桩机应具备以下资料：
- a) 压桩机的产品合格证；
 - b) 压桩机型号、机架重量，整机的额定压力；
 - c) 压桩机的外型尺寸；
 - d) 履带的接地压强；
 - e) 夹具的形式；
 - f) 液压油缸的数量、直径等，额定压力和压桩力的对应关系。
- 8.4.4 施工前应进行试验施工，找出达到设计要求单桩承载力所对应的柱锤压力值及夯填承载体填充料体积，并把该指标作为工程桩施工承载体的控制指标。
- 8.4.5 静压夯扩挤密桩施工工艺如图 8。

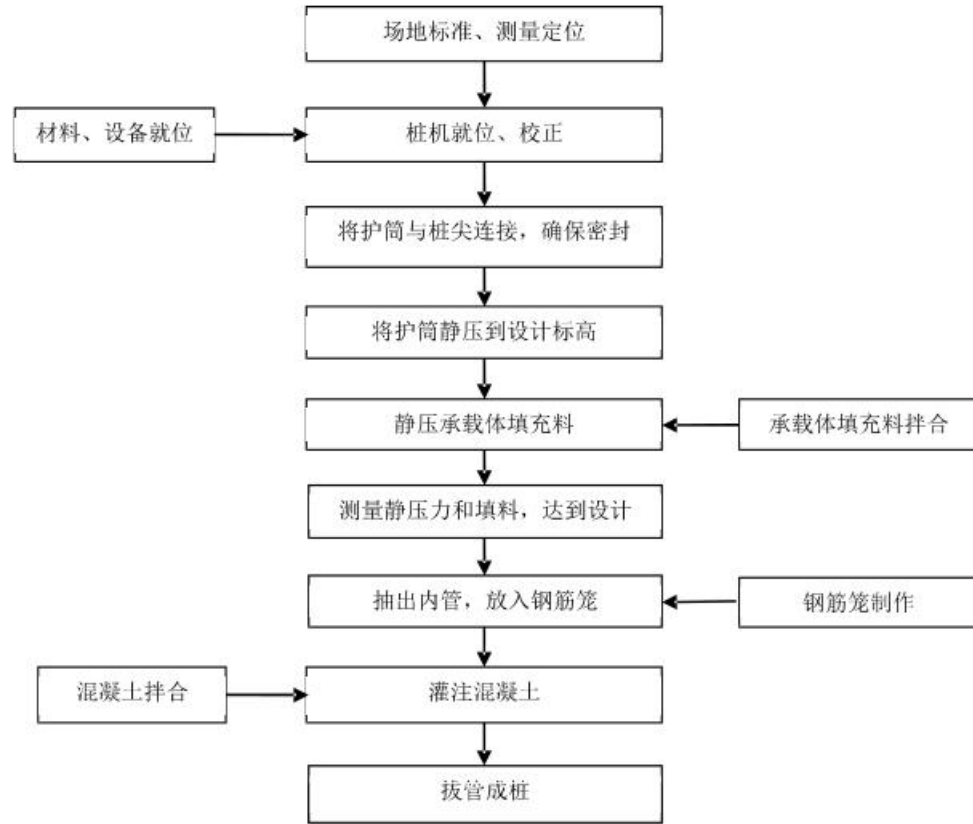


图 8 静压夯扩挤密桩施工工艺

8.4.6 静压夯扩挤密桩施工质量控制应符合如下规定：

- 沉管必须到设计要求的持力层，当深度无法满足设计要求时，应及时分析原因，调整设计方案；
- 送桩器截面应与静压内管尺寸相匹配，并有足够的长度、刚度和强度，表面应有一定的防滑措施；
- 成孔过程中严格控制护筒的垂直度，当护筒垂直度偏差大于 0.5% 时，应停止施工，并调平设备；
- 静压夯扩挤密桩施工采用双控的原则，填料体积和压力必须达到试验要求的限制。当填料量大于试验值后，用内管静压填料，测量静压桩机的压力，当压力值不小于某一限制，且维持时间大于 5~10 s，即可停止施工；
- 静压夯扩挤密桩桩身可以现浇，也可采用预制构件。

8.5 静压夯扩挤密桩施工

8.5.1 适合范围：含水率较大的黏性土、粉土或淤泥地层。

8.5.2 预制桩身夯扩挤密桩的施工工艺分为以下两种：

8.5.2.1 第一种为先沉入预制桩，然后在预制桩内施工夯扩挤密桩（施工工艺见图 9）。

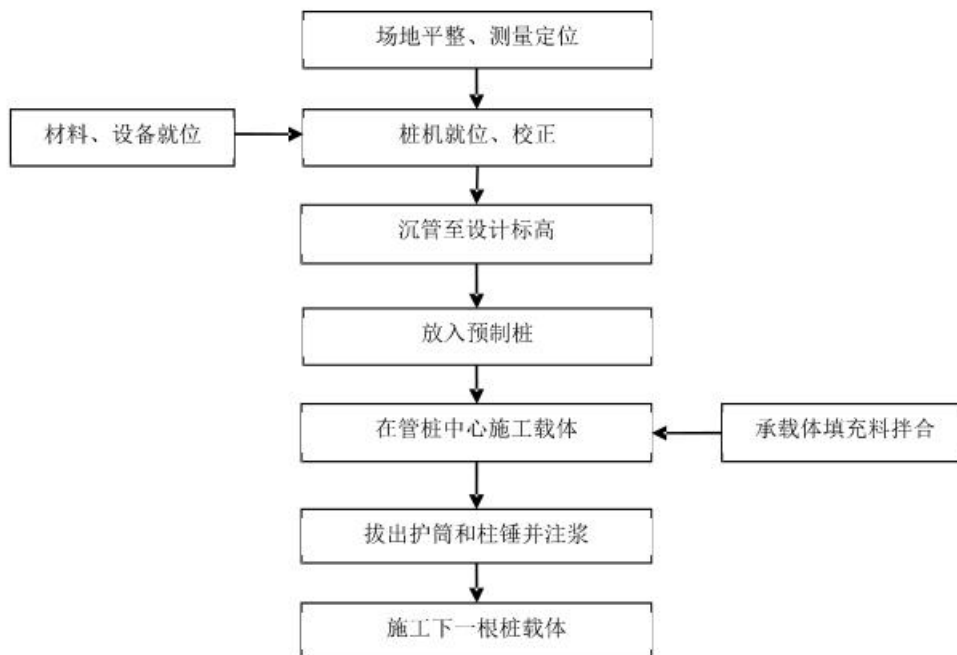


图9 第一种预制桩身夯扩挤密桩施工工艺

8.5.2.2 第二种为先成孔施工载体，然后再沉入预制桩与载体结合（施工工艺见图 10）。

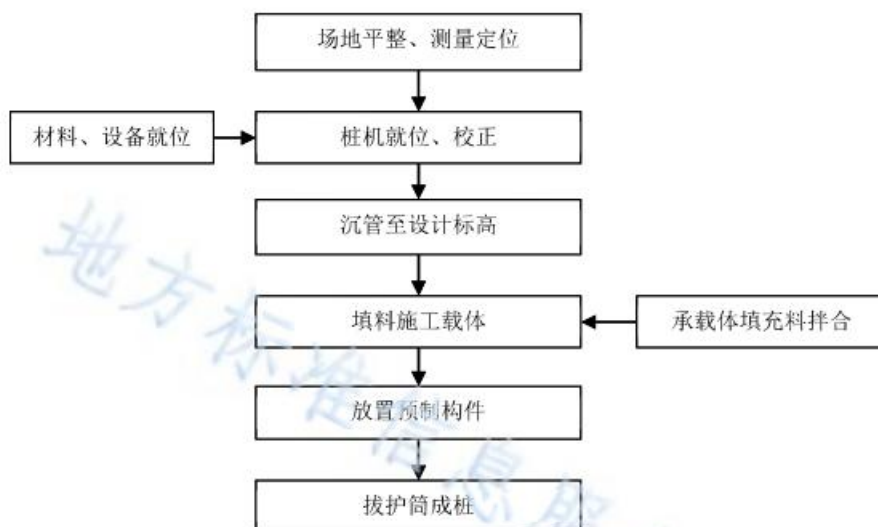


图 10 第二种预制桩身夯扩挤密桩施工工艺

8.5.3 预制桩身夯扩挤密桩的施工质量控制应符合以下要求：

- 当桩身长度较长时，应采用多节预制桩焊接而成，焊接时将预制桩吊起，与下一节桩对接采用点焊，预制桩的吊装和焊接、钢筋预留长度应符合 JGJ 94 的规定；
- 当桩身弯矩较大或承受水平力时，应对预制桩桩顶以下一定范围内进行填充密实，长度不小于 5 倍桩径；
- 施工完毕后应在预制桩桩顶植入钢筋，钢筋直径、数量和强度满足构造和受力要求。
- 第一种工艺的施工控制措施应符合以下几点：
 - 1) 应选择合适的护筒与预制桩身，护筒内径大于预制桩外径不小于 80 mm；

- 2) 选择合适的夯锤，其直径应小于预制桩身的内径，且锤与预制桩内侧的孔隙要便于承载体填充料的填入；
- 3) 严格控制填料和柱锤的落距，避免柱锤在预制桩内夯击造成预制桩桩端的损坏；
- 4) 拔管注浆应根据地基土土性、桩周孔隙决定注浆的压力，并控制提拔护筒的速度；
- 5) 由于预制桩内径较小，当采用质量较小的锤进行夯击时，应进行能量换算，增大提锤的高度。
- d) 第二种工艺的施工控制措施应符合以下几点：
 - 1) 选择合适的施工护筒，护筒内径大于预制桩外径不小于 80 mm；
 - 2) 施工中严格控制预制桩桩长，确保施工完桩顶与设计桩顶标高一致；
 - 3) 三次贯入度测量完毕后，应继续填料夯实，使夯实后的填料顶标高与护筒底齐平；
 - 4) 植入预制桩后，应采取静压或锤击的处理方式使预制桩与承载体结合良好；
 - 5) 当护筒与预制桩间有较大孔隙时，应采用填料或注浆等措施对孔隙进行处理。

9 验收

- 9.1 夯扩挤密桩基应进行桩位、桩长、桩径、桩身质量和单桩承载力的检验。
- 9.2 桩位、桩长、桩径等的偏差应符合 GB 50202 的规定。
- 9.3 应对混凝土、钢材、预制构件等进行检查，并应进行相关的抽样检测。
- 9.4 施工中应对成孔、钢筋笼、混凝土进行检查，混凝土应留试块并进行相关试验，试块留置数量应符合 GB 51004 的规定。
- 9.5 施工过程中应对水泥及其它填充料的总体积、三次累计贯入度进行检查。
- 9.6 夯扩挤密桩施工完毕后应进行单桩承载力和桩身质量的抽样检测。
- 9.7 夯扩挤密桩基桩的单桩承载力检测应符合下列规定：
 - a) 单桩承载力检测应采用静载荷试验；
 - b) 单位工程检验桩数量不应少于同条件下总桩数的 1%，且不应少于 3 根，当总桩数小于 50 根时，检测数量不应少于 2 根。
- 9.8 桩身质量检测可采用低应变法检测，并按 JGJ 106 执行。低应变法检测数量应符合下列规定：
 - a) 柱下为三桩或三桩以下承台，每个承台下基桩抽检数量不得少于 1 根；
 - b) 计等级为甲级或地质条件复杂的夯扩挤密桩项目，抽检数量不应少于总桩数的 30%，且不应少于 20 根；
 - c) 其他工程抽检数量不应少于总桩数的 20%，且不应少于 10 根。
- 9.9 夯扩挤密桩复合地基的检测应符合下列规定：
 - a) 复合地基承载力检测宜采用复合地基静载荷试验、增强体竖向抗压静载荷试验；有经验时，可采用增强体竖向抗压静载荷试验、桩间土的载荷板试验；
 - b) 夯扩挤密桩复合地基和增强体竖向抗压静载荷试验的检测方法和检测数量应按 JGJ 79 执行，桩间土的载荷板试验应按 GB 50007 执行；
 - c) 增强体应进行桩身完整性的检测，检测方法应符合 JGJ 106 的规定。
- 9.10 在桩身混凝土强度达到设计要求的前提下，从成桩到开始检测的休止时间，对于砂类土不应少于 7 d，粉土不应少于 10 d，非饱和黏性土不应少于 15 d，饱和黏性土、淤泥或淤泥质土不应少于 25 d。
- 9.11 给设计提供参数的单桩静载荷试验可采用快硬水泥施工承载体，用钢管或预制构件代替桩身进行试验。
- 9.12 夯扩挤密桩的质量检验标准见表 4。

表4 夯扩挤密桩的施工质量检验标准

项	序	检查项目	允许偏差		检查方法
			单位	数值	
主控项目	1	桩位	mm	70	测量桩中心
	2	孔深	mm	±300	检查护筒沉入深度
	3	混凝土强度	设计要求		试件报告或钻芯取样送检
	4	桩身质量检验	按 JGJ 06 执行		低应变检测
	5	承载力	按 JGJ 106 执行		静载荷试验
一般项目	1	垂直度	应按规范 GB 50202 执行		吊垂球
	2	桩径	应按规范 GB 50202 执行		用钢尺量
	3	坍落度值	mm	160~220	坍落度仪
	4	钢筋笼安装深度	mm	±100	用钢尺量
	5	混凝土充盈系数	>1		检查每根桩的实际灌注量
	6	桩顶标高	mm	+30, -50	水准仪测量

地方标准信息服务平台

附录 A
(规范性)
夯扩挤密桩施工记录表

表 A.1 夯扩挤密桩施工记录表

单位工程:				分部工程:				填料类别:				编号:		001	
施工单位:				设计桩径:				施工日期:				桩机号:			
序号	桩号	开始时间	结束时间	场地标高 (m)	桩顶标高 (m)	成孔深度 (m)	三次贯入度 (cm)	垂直度偏差 (%)	填料量 (m³)	备注					