

式中: V ——不计承台及其上填土自重,在作用基本组合下斜截面的最大剪力设计值,它等于斜截面以外各桩相应竖向净反力之和;

b ——承台计算截面处的计算宽度,双向阶梯形承台变阶处及双向锥形承台的计算宽度要经过折算;

h_0 ——计算宽度处的承台有效高度;

α ——剪切系数;

β_{hs} ——受剪切承载力截面高度的影响系数,按 $\beta_{hs} = \left(\frac{800}{h_0}\right)^{\frac{1}{4}}$ 计算,式中 h_0 小于 800mm 时,取为 800mm, h_0 大于 2000mm 时,取为 2000mm;

λ ——计算截面的剪跨比, $\lambda_x = \frac{a_x}{h_0}$, $\lambda_y = \frac{a_y}{h_0}$, a_x, a_y 为柱边或承台变阶处至所计算一排桩的桩边水平距离,当 $\lambda < 0.25$ 时,取 $\lambda = 0.25$,当 $\lambda > 3.0$ 时,取 $\lambda = 3.0$ 。

5. 桩身结构设计

钢筋混凝土预制桩有现场预制和工厂预制两种,它们均应满足搬运、堆存、吊立以及打入过程中的受力要求。对于较长桩,应分段制作并有可靠的接桩措施。选择预制桩时,一般要按施工条件加以验算。对于混凝土现场灌注桩一般只按使用阶段进行结构强度计算。尤其是对于承受较大水平荷载作用和弯矩较大的桩以及抗拔桩应进行计算确定配筋。

桩身混凝土强度应满足式(4-44)的要求。

例 4-1 某实验大厅地质剖面及土性指标如图 4-34 及表 4-15 所示。设上部结构传至设计地面处,相应于作用标准组合的竖向力 $F_k = 2035\text{kN}$,弯矩 $M_k = 330\text{kN} \cdot \text{m}$,水平力 $H_k = 55\text{kN}$ 。经过经济技术比较后决定采用钢筋混凝土预制桩,设计计算该桩基础(相应于作用准永久组合时,竖向力 $F = 1950\text{kN}$)的沉降。

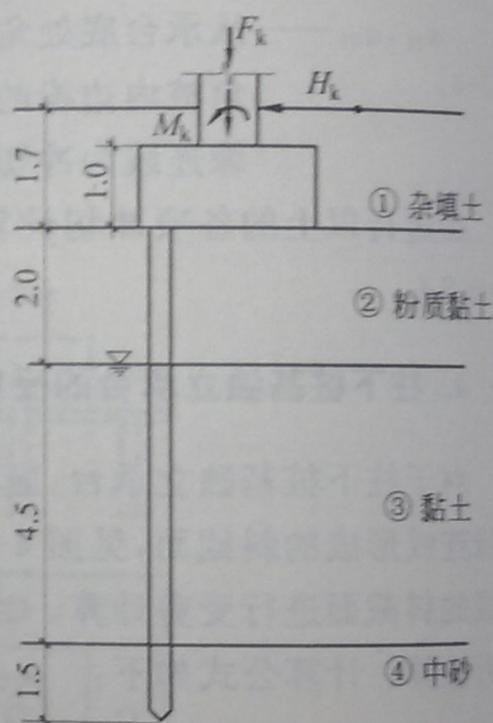


图 4-34 例 4-1 附图

表 4-15 例 4-1 中地基土物理力学性质指标表

编号	土名	厚度 h_i /m	γ / (kN/m ³)	G	w /%	e	w_L /%	w_P /%	I_P	I_L	饱和度 S_r	E_s /MPa	N	q_{pk} / (kN/m ²)	q_{sk} / (kN/m ²)
①	人工填土	1.7	16												
②	粉质黏土	2.0	18.7	2.71	24.2	0.8	29	17	12	0.6	0.82	8.5			64
③	黏土	4.5	19.1	2.71	37.5	0.95	38	18	20	0.98	1.0	6.0			41.2
④	中砂	4.6	20	2.68							1.0	20	20	5000	60.7

														续表	
编号	土名	厚度 h_i /m	γ / (kN/ m^3)	G	w /%	e	w_L /%	w_P /%	I_P	I_L	饱和 度 S_r	E_s /MPa	N	q_{pk} / (kN/ m^2)	q_{sik} / (kN/ m^2)
⑤	粉质黏土	8.6	19.8	2.71	27.7	0.75	29	17	12	0.89	1.0	8.0			
⑥	密实砾石层	>8	20.2										40		

注：桩穿越各层土的平均内摩擦角为 $\bar{\varphi} = 20^\circ$ 。

解 1) 初步选择持力层, 确定桩型和尺寸

根据荷载和地质条件, 应初步考虑以第④层中砂土为桩端持力层。采用截面为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的预制钢筋混凝土方桩。桩端进入持力层为 1.5m , 桩长 8m , 承台埋深为 1.7m 。

2) 确定单桩承载力特征值

根据式(4-8)估算单桩承载力特征值:

$$Q_{uk} = q_{pk}A_p + u \sum q_{sik}l_i$$

$$A_p = 0.3 \times 0.3 = 0.09(\text{m}^2)$$

$$u = 0.3 \times 4 = 1.2(\text{m})$$

$$R_a = Q_{uk}/2 = [5000 \times 0.09 + 1.2 \times (64 \times 2.0 + 41.2 \times 4.5 + 60.7 \times 1.5)]/2 = 468(\text{kN})$$

3) 初步确定桩数及承台尺寸

先假设承台尺寸为 $2\text{m} \times 2\text{m}$, 厚度为 1m , 承台及其上土平均重度为 $20\text{kN}/\text{m}^3$, 则承台及其上土自重的标准值为

$$G_k = 20 \times 2 \times 2 \times 1.7 = 136(\text{kN})$$

根据式(4-37)

$$n \geq \frac{F_k + G_k}{R_a} = \frac{2035 + 136}{468} = 4.64$$

可取 5 根桩, 设承台的平面尺寸为 $1.6\text{m} \times 2.6\text{m}$, 如图 4-35 所示。

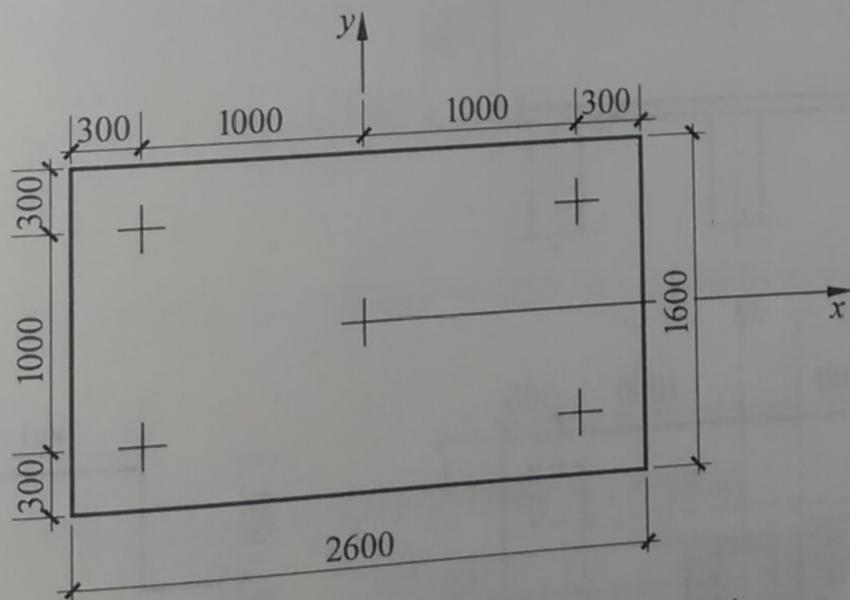


图 4-35 例 4-1 桩的布置及承台尺寸

4) 群桩基础中单桩承载力验算

按照设计的承台尺寸, 计算 $G_k = 1.6 \times 2.6 \times 1.7 \times 20 = 141.4(\text{kN})$

单桩的平均竖向力按式(4-38)计算:

各桩不计承台以及其上土重 G 部分的净反力为

$$\text{各桩平均竖向力 } \bar{N} = 1.35 \frac{F_k}{n} = 549.45 (\text{kN})$$

$$\text{最大竖向力 } N_{\max} = 1.35 \left(\frac{F_k}{n} + \frac{M_y x_{\max}}{\sum x_j^2} \right) = 1.35 \times (407 + 105.90) = 692.4 (\text{kN})$$

对于 I—I 断面:

$$M_y = \sum N_i x_i = 2N_{\max} \times x_i = 2 \times 692.4 \times 0.7 = 969.4 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{根据式(2-73), 钢筋面积 } A_s = \frac{M_y}{0.9 f_y h_0} = \frac{969.4 \times 10^6}{0.9 \times 300 \times 850} = 4224 (\text{mm}^2)$$

采用 14 根直径为 20mm 钢筋, $A_s = 4397 \text{mm}^2$, 平行于 x 轴布置。

对于 II—II 断面:

$$M_x = \sum N_i y_i = 2\bar{N} \times y_i = 2 \times 549.5 \times 0.30 = 329.7 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{钢筋面积 } A_s = \frac{M_x}{0.9 f_y h_0} = \frac{329.7 \times 10^6}{0.9 \times 300 \times 850} = 1436.6 (\text{mm}^2)$$

选用 14 根直径为 12mm 钢筋, $A_s = 1582 \text{mm}^2$, 平行于 y 轴布置。

6) 承台抗冲切验算

(1) 柱的向下冲切验算

根据式(4-50a)有

$$F_l \leq 2[\beta_{0x}(b_c + a_{0y}) + \beta_{0y}(a_c + a_{0x})]\beta_{hp} f_t h_0$$

$$\text{式中: } a_{0x} = 0.55 \text{m}, \lambda_{0x} = \frac{a_{0x}}{h_0} = \frac{0.55}{0.85} = 0.647, \beta_{0x} = \frac{0.84}{\lambda_{0x} + 0.2} = 0.99$$

$$a_{0y} = 0.15 \text{m}, \lambda_{0y} = 0.25, \beta_{0y} = 1.87$$

$$b_c = 0.4 \text{m}, a_c = 0.6 \text{m}, \beta_{hp} = 1 - \frac{1 - 0.9}{2000 - 800} (900 - 800) = 0.992$$

则

$$2[\beta_{0x}(b_c + a_{0y}) + \beta_{0y}(a_c + a_{0x})]\beta_{hp} f_t h_0 = 2[0.99(0.4 + 0.15) + 1.87(0.6 + 0.55)] \times 0.992 \times 1100 \times 0.85 = 5000 (\text{kN})$$

$$\text{柱顶平均净反力 } N = \frac{2747}{5} = 549.4 (\text{kN})$$

根据式(4-50b)有

$$F_l = F - N = 2747 - 549.4 = 2198 (\text{kN})$$

满足式(4-50a)的条件。

(2) 角柱的冲切验算

根据式(4-51a), 冲切力 N_l 必须不大于抗冲切力, 即满足

$$N_l \leq \left[\beta_{0x} \times \left(c_1 + \frac{a_{12}}{2} \right) + \beta_{0y} \left(c_1 + \frac{a_{12}}{2} \right) \right] \beta_{hp} f_t h_0$$

式中 $c_1 = c_2 = 0.45 \text{m}$, 则

各桩不计承台以及其上土重 G 部分的净反力为

$$\text{各桩平均竖向力 } \bar{N} = 1.35 \frac{F_k}{n} = 549.45 (\text{kN})$$

$$\text{最大竖向力 } N_{\max} = 1.35 \left[\frac{F_k}{n} + \frac{M_y x_{\max}}{\sum x_j^2} \right] = 1.35 \times (407 + 105.90) = 692.4 (\text{kN})$$

对于 I—I 断面:

$$M_y = \sum N_i x_i = 2N_{\max} \times x_i = 2 \times 692.4 \times 0.7 = 969.4 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{根据式(2-73), 钢筋面积 } A_s = \frac{M_y}{0.9 f_y h_0} = \frac{969.4 \times 10^6}{0.9 \times 300 \times 850} = 4224 (\text{mm}^2)$$

采用 14 根直径为 20mm 钢筋, $A_s = 4397 \text{mm}^2$, 平行于 x 轴布置。

对于 II—II 断面:

$$M_x = \sum N_i y_i = 2\bar{N} \times y_i = 2 \times 549.5 \times 0.30 = 329.7 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$\text{钢筋面积 } A_s = \frac{M_x}{0.9 f_y h_0} = \frac{329.7 \times 10^6}{0.9 \times 300 \times 850} = 1436.6 (\text{mm}^2)$$

选用 14 根直径为 12mm 钢筋, $A_s = 1582 \text{mm}^2$, 平行于 y 轴布置。

6) 承台抗冲切验算

(1) 柱的向下冲切验算

根据式(4-50a)有

$$F_l \leq 2[\beta_{0x}(b_c + a_{0y}) + \beta_{0y}(a_c + a_{0x})]\beta_{\text{hp}} f_t h_0$$

$$\text{式中: } a_{0x} = 0.55 \text{m}, \lambda_{0x} = \frac{a_{0x}}{h_0} = \frac{0.55}{0.85} = 0.647, \beta_{0x} = \frac{0.84}{\lambda_{0x} + 0.2} = 0.99$$

$$a_{0y} = 0.15 \text{m}, \lambda_{0y} = 0.25, \beta_{0y} = 1.87$$

$$b_c = 0.4 \text{m}, a_c = 0.6 \text{m}, \beta_{\text{hp}} = 1 - \frac{1 - 0.9}{2000 - 800} (900 - 800) = 0.992$$

则

$$\begin{aligned} & 2[\beta_{0x}(b_c + a_{0y}) + \beta_{0y}(a_c + a_{0x})]\beta_{\text{hp}} f_t h_0 \\ &= 2[0.99(0.4 + 0.15) + 1.87(0.6 + 0.55)] \times 0.992 \times 1100 \times 0.85 = 5000 (\text{kN}) \end{aligned}$$

$$\text{桩顶平均净反力 } N = \frac{2747}{5} = 549.4 (\text{kN})$$

根据式(4-50b)有

$$F_l = F - N = 2747 - 549.4 = 2198 (\text{kN})$$

满足式(4-50a)的条件。

(2) 角桩的冲切验算

根据式(4-51a), 冲切力 N_l 必须不大于抗冲切力, 即满足

$$N_l \leq \left[\beta_{1x} \times \left(c_2 + \frac{a_{1y}}{2} \right) + \beta_{1y} \left(c_1 + \frac{a_{1x}}{2} \right) \right] \beta_{\text{hp}} f_t h_0$$

式中 $c_1 = c_2 = 0.45 \text{m}$, 则

$$a_{1x} = 0.55, \quad \lambda_{1x} = \frac{a_{1x}}{h_0} = 0.647, \quad \beta_{1x} = \frac{0.56}{\lambda_{1x} + 0.2} = 0.66$$

$$a_{1y} = 0.15, \quad \lambda_{1y} = 0.25, \quad \beta_{1y} = \frac{0.56}{0.45} = 1.24$$

$$N_l = N_{\max} = 692.4 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{抗冲切力} &= \left[0.66 \times \left(0.45 + \frac{0.15}{2} \right) + 1.24 \times \left(0.45 + \frac{0.55}{2} \right) \right] \times 0.992 \times 1100 \times 0.85 \\ &= 1.246 \times 0.992 \times 1100 \times 0.850 = 1156 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

符合要求。

7) 承台抗剪验算

根据式(4-54a), 剪切力 V 必须不大于抗剪切力, 即满足

$$V \leq \beta_{hs} \alpha f_c b h_0$$

对于 I—I 截面:

$$a_x = 0.55 \text{ m}; \quad \lambda_x = \frac{a_x}{h_0} = 0.647; \quad \alpha = \frac{1.75}{\lambda_x + 1} = 1.06$$

$$\beta_{hs} = \left(\frac{800}{h_0} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.985; \quad b = 1.6 \text{ m}$$

$$V = 2 \times N_{\max} = 2 \times 692.4 = 1384.8 \text{ (kN)}$$

$$\text{抗剪切力} = 0.985 \times 1.06 \times 1100 \times 1.6 \times 0.85 = 1562 \text{ (kN)}$$

符合要求。

对于 II—II 断面:

$$a_{1y} = 0.15 \text{ m}, \quad \lambda_y = 0.25, \quad \alpha = \frac{1.75}{0.25 + 1} = 1.4, \quad a = 2.6 \text{ m}$$

$$V = 2 \times \bar{N} = 2 \times 549.45 = 1098.9 \text{ (kN)}$$

$$\text{抗剪力} = 0.985 \times 1.4 \times 1100 \times 2.6 \times 0.85 = 3352 \text{ (kN)}$$

符合要求。

8) 沉降计算

沉降计算根据式(4-28), 采用实体深基础计算方法, 计算中心点沉降。用两种方法计算桩端处的附加应力及桩基沉降。

(1) 荷载扩散法计算

根据式(4-27)

$$p_0 = \frac{F + G_k - p_{c0} \times a \times b}{\left(b_0 + 2l \times \tan \frac{\bar{\varphi}}{4} \right) \left(a_0 + 2l \times \tan \frac{\bar{\varphi}}{4} \right)}$$

式中 F 为相应于作用准永久组合时分配到桩顶的竖向力。

$$F = 1950 \text{ kN}; \quad G_k = 141.4 \text{ kN}; \quad p_{c0} = 16 \times 1.7 = 27.2 \text{ (kN/m}^2\text{)};$$

$$l = 8 \text{ m}; \quad a_0 = 2.3 \text{ m}; \quad b_0 = 1.3 \text{ m}; \quad a = 2.6 \text{ m}; \quad b = 1.6 \text{ m}$$

$$\text{则 } p_0 = \frac{1950 + 141.4 - 27.2 \times 2.6 \times 1.6}{(2.3 + 2 \times 8 \tan 5^\circ)(1.3 + 2 \times 8 \tan 5^\circ)} = \frac{1978}{3.7 \times 2.7} = 198 \text{ (kPa)}$$

$$s = \psi_p s'$$

s' 按照第 2 章的方法计算。

$$s' = \sum \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$$

对于扩散后实体基础,查表 2-19 确定平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$, 计算结果见表 4-16。

$$\frac{a}{b} = \frac{3.7}{2.7} = 1.37$$

表 4-16 平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$ 计算表

z/m	z/b	$\bar{\alpha}_i$	E_s
0	0	1.0	20
1.35	0.5	0.92	20
2.7	1.0	0.747	20
3.1	1.15	0.728	20
5.4	2.0	0.4956	8
8.1	3.0	0.3634	8
8.7	3.22	0.3464	8
9.3	3.44	0.3278	8

$$\begin{aligned} \sum s'_i &= 198 \times \left\{ [(1.35 \times 0.92) + (2.7 \times 0.747 - 1.35 \times 0.924) \right. \\ &\quad \left. + (0.728 \times 3.1 - 2.7 \times 0.747)] \times \frac{1}{20} + [(5.4 \times 0.4956 - 3.1 \times 0.728) \right. \\ &\quad \left. + (8.1 \times 0.3634 - 5.4 \times 0.4956) + (8.7 \times 0.3464 - 8.1 \times 0.3634)] \times \frac{1}{8} \right\} \\ &= 41.1(\text{mm}) \end{aligned}$$

$$\Delta s_n = (9.3 \times 0.328 - 8.7 \times 0.3464) \times \frac{0.198}{8} = 0.863(\text{mm}) < 0.025 \sum s_i = 1.0(\text{mm})$$

计算到桩端以下 8.7m 即可。计算变形计算深度内压缩模量的当量值 \bar{E}_s 。

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{si}}} = \frac{(1.24 + 0.775 + 0.24 + 0.42 + 0.267) + 0.07}{0.1128 + 0.086 + 0.009} \\ &= \frac{3.01}{0.21} = 14.43(\text{MPa}) < 15(\text{MPa}) \end{aligned}$$

查表 4-13 得到

$$\psi_p = 0.5$$

$$s = \psi_p s' = 41.1 \times 0.5 = 20.6(\text{mm})$$

(2) 扣除摩阻力法: 根据式(4-29):

$$p_0 = \frac{F + G - (a_0 + b_0) \sum q_{sik} h_i - p_{c_0} ab}{a_0 b_0}$$

$$a_0 = 2.3\text{m}; b_0 = 1.3\text{m}$$

式中

$$p_0 = \frac{1950 + 141.4 - (2.3 + 1.3)(64 \times 2.0 + 41.2 \times 4.5 + 60.7 \times 1.5) - 27.2 \times 2.6 \times 1.6}{2.3 \times 1.3}$$

喷射管的下端有图 5-11 所示的喷头,经喷压力为 0.7MPa,输浆管压力为 2.0~3.0MPa。施工中边喷射,边旋转,边提头,高压水和气从横向的管口喷出,浆液则从喷头的下端喷出。被高压水和压缩空气所切削的地基土与水泥浆相混合,形成水泥、土和水的混合物,凝固成旋喷桩,直径可大于二重管法所形成的旋喷桩。

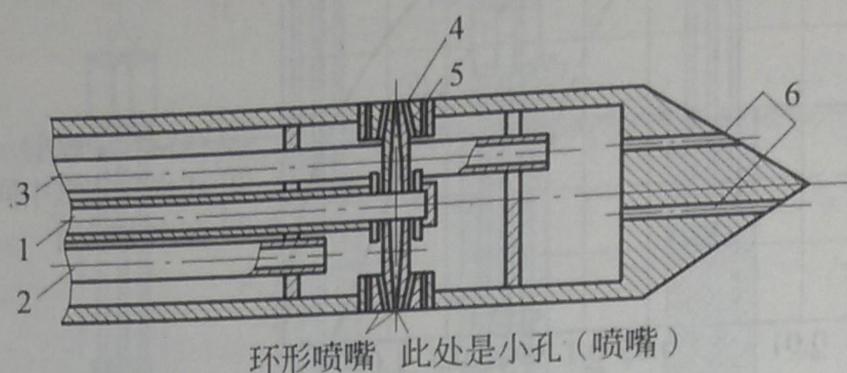


图 5-11 三管喷头结构示意图

1—输水管; 2—输气管; 3—输浆管; 4—喷水口; 5—喷气口; 6—喷浆口

旋喷桩的施工顺序如图 5-12 所示。①用振动打桩机或钻机成孔,孔径为 150~200mm。②插入旋喷管。③开动高压泵、泥浆泵和空压机,分别向旋喷管输送高压水、水泥浆和压缩空气,同时开始旋转和提升。④连续工作直至预定的旋喷高度后停止。⑤拔出旋喷管和套管,形成旋喷桩。

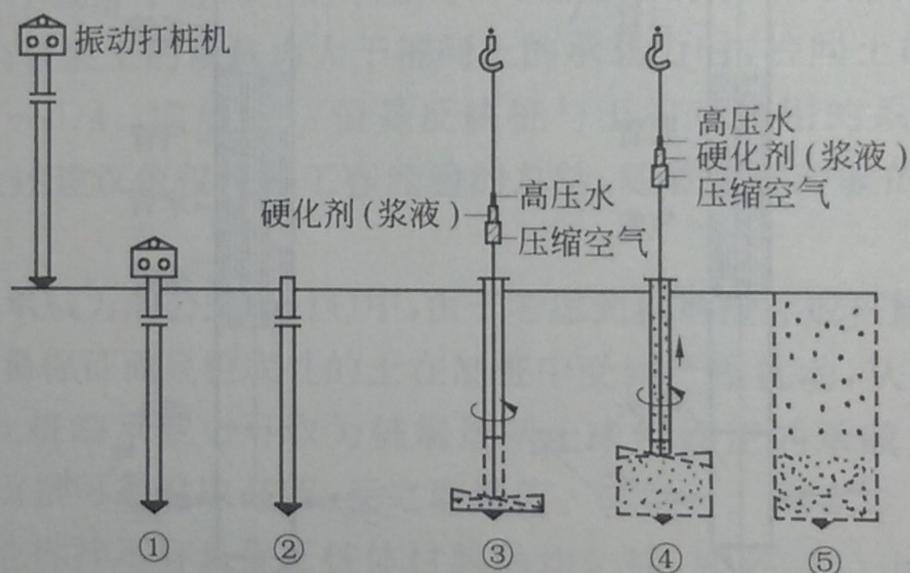


图 5-12 旋喷桩的施工顺序

如果将孔距控制在喷射的有效范围内,喷射时,旋喷管只提升不旋转,即固定喷射方向,称为定喷注浆。或者是虽旋转,但角度较小,称为摆喷注浆。定喷注浆或摆喷注浆能在地下形成连续的墙体,可用于基坑的围护和地下防渗阻水作用。

高压喷射注浆法适用的土层与水泥土搅拌法相似,常用于处理淤泥、淤泥质土,流塑、软塑和可塑的黏性土,松软的粉土、黄土以及松散的砂土和碎石土。对于土层中含有大直径的块石,大量植物根茎或较高有机质含量以及地下水流速太大的工况,则应进行现场试验以确定其适用性。

此法的设计可参照 CFG 桩所用的方法。初步设计时,可用式(5-13)确定复合地基承载力,式中的桩间土承载力折减系数 β 值按经验可取为 0.1~0.5,桩间土承载力低时取小值。

例 5-1 按作用标准组合某砖石承重结构条形基础上的竖向荷载 $F_k = 190\text{kN/m}$,基础布置和地基土层断面如图 5-13 所示。考虑基础下用厚 1.5m 砂垫层处理。试设计砂垫层

(基础及其上填土的平均重度 $\bar{\gamma}$ 取 19.6kN/m^3)。

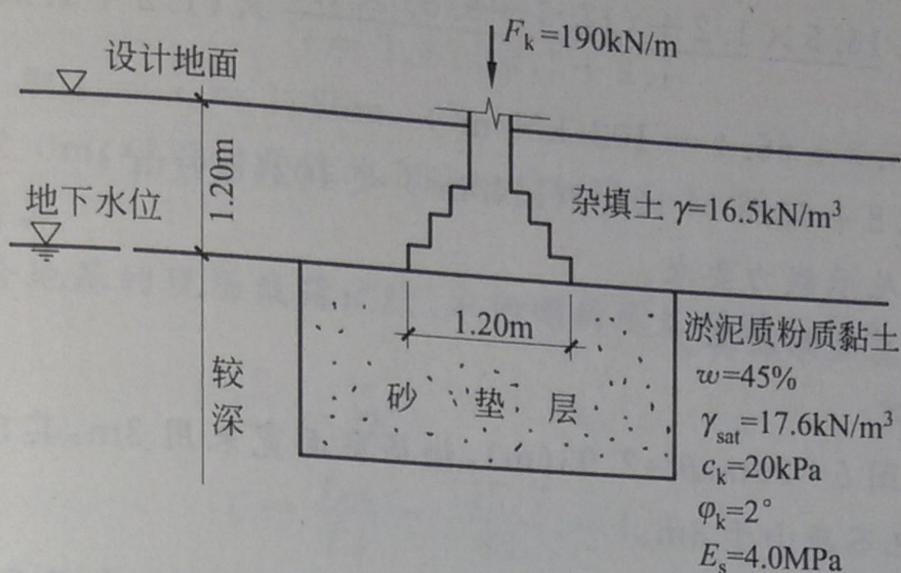


图 5-13 例 5-1 附图

解 (1) 验算砂垫层承载力

基底压力
$$p_k = \frac{F_k + G_k}{b} = \frac{190 + 19.6 \times 1.2 \times 1.2}{1.2} = 181.9 (\text{kN/m}^2)$$

查表 5-1 砂、砾料垫层承载力特征值 $f_{ak} = 150 \sim 200 \text{kPa}$

取 $f_{ak} = 175 \text{kPa}$

深度修正后承载力特征值
$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 175 + 1.0 \times 16.5 \times (1.2 - 0.5) \\ &= 186.5 (\text{kPa}) > 181.9 (\text{kPa}) \end{aligned}$$

故垫层顶面承载力满足要求。

(2) 验算砂垫层底面淤泥质粉质黏土承载力,按式(5-1)要求

$$p_{cz} + p_z \leq f_{az}$$

求自重应力 p_{cz} 。换砂垫层后,取垫层料的有效重度为 10kN/m^3 。

$$p_{cz} = 16.5 \times 1.20 + 10 \times 1.50 = 34.8 (\text{kN/m}^2)$$

由式(5-2)求 p_z :

$$p_z = \frac{(p_k - p_{c0})b}{b + 2z \tan \theta}$$

式中:基底压力 $p_k = 181.9 \text{kN/m}^2$

$$\text{基底自重应力 } p_{c0} = 1.2 \times 16.5 = 19.8 (\text{kN/m}^2)$$

由表 5-2,当 $\frac{z}{b} = \frac{1.5}{1.2} = 1.25 > 0.5$,砂垫层应力扩散角 $\theta = 30^\circ$ 。

代入上式

$$p_z = \frac{(181.9 - 19.8) \times 1.2}{1.2 + 2 \times 1.5 \times 0.577} = \frac{194.5}{2.93} = 66.4 (\text{kN/m}^2)$$

求垫层底面淤泥质土的承载力,按式(2-33):

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k$$

由 $\phi_k = 2^\circ$,查表 2-16 得, $M_b = 0.03, M_d = 1.12, M_c = 3.32$ 。代入上式得

$$\begin{aligned}
 f_a &= 0.03 \times (17.6 - 9.8) \times 1.2 \\
 &+ 1.12 \times \frac{16.5 \times 1.2 + (17.6 - 9.8) \times 1.5}{1.2 + 1.5} \times (1.2 + 1.5) + 3.32 \times 20 \\
 &= 0.28 + 35.3 + 66.4 = 102 (\text{kN/m}^2) \\
 p_{cz} + p_z &= 34.8 + 66.4 = 101.2 (\text{kN/m}^2) < 102 (\text{kN/m}^2)
 \end{aligned}$$

故垫层底淤泥质土满足承载力要求。

本例题不进行地基变形验算。

(3) 垫层尺寸确定

根据应力扩散范围 $b + 2z \tan \theta = 2.93 (\text{m})$, 垫层底面宽采用 3m , 其顶面尺寸可根据基坑开挖放坡要求确定, 也不应小于 3m 。

例 5-2 地质剖面如例 5-1, 按作用标准组合, 条形基础每延米荷载 $F_k = 180 \text{kN/m}$ 。基础的埋置深度 $d = 1.2 \text{m}$, 采用砂石桩置换法处理淤泥质粉质黏土。砂石桩长 6.0m (设计地面以下 7.2m), 直径 $d_0 = 800 \text{mm}$, 采用矩形布置, 要求复合地基承载力提高 1.3 倍, 试设计地基基础。

解: (1) 求淤泥质粉质黏土的地基承载力特征值

初设基础宽度 2.0m , 埋深 1.2m , 按式 (2-33) 求加固前地基承载力。由 $\varphi_k = 2^\circ$, 查表 2-16 得, $M_b = 0.03, M_d = 1.12, M_c = 3.32$, 代入式 (2-33) 得 $f_a = 89.0 \text{kPa}$ 。按承载力提高 1.3 倍要求, 则 $f_{\text{spk}} = 1.3 \times 89.0 = 115.7 (\text{kPa})$ 。

(2) 计算复合地基面积置换率

根据式 (5-7):

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

设 $n = 3.0$, 可计算出 $m = 0.15$ 。考虑两侧至少需要一排护桩, 其布置如图 5-14 所示。

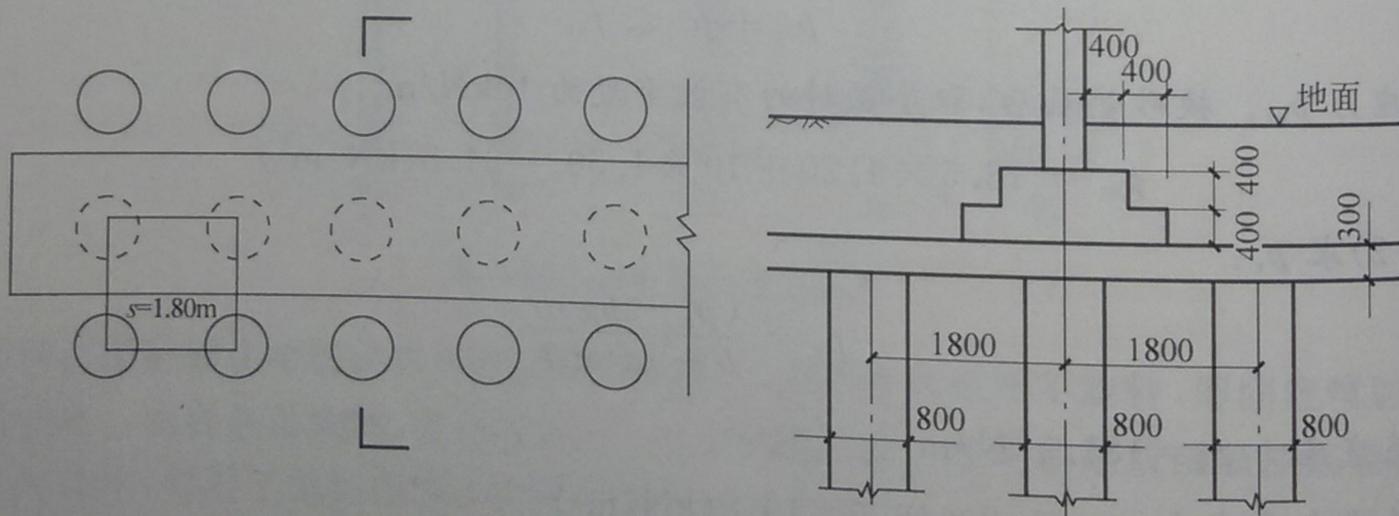


图 5-14 例 5-2 附图

(3) 确定基础宽度

$$b \geq \frac{F_k}{f_a - \bar{\gamma}d} = \frac{180}{115.7 - 19.6 \times 1.2} = \frac{180}{92.2} = 1.95 (\text{m})$$

设计桩距

按式 (5-5)

$$m = \frac{d_0^2}{d_c^2} = \frac{0.8^2}{(1.13s)^2}$$

$$s^2 = \frac{0.64}{0.1916} = 3.34$$

$$s = 1.83\text{m}$$

按正方形布置：取 $s_x = s_y = 1.80\text{m}$

基础宽度选为 2.0m ，砂石垫层选为 300mm ，如图 5-14 所示。

(4) 地基变形计算

由于未进行复合地基的现场载荷试验，本例题的地基经砂石桩处理后，上层 6m 复合土按式(5-9)计算：

$$E_{ps} = \zeta E_s$$

$$\zeta = \frac{f_{spk}}{f_{ak}} = \frac{115.7}{89} = 1.3$$

$$E_{ps} = 1.3 \times 4 = 5.2(\text{MPa})$$

6m 以下仍按原淤泥质粉质黏土， $E_s = 4\text{MPa}$ ，计算地基的沉降，计算过程从略。

例 5-3 地基和基础情况同例 5-2，但作用的标准组合为 $F_k = 250\text{kN/m}$ ，鉴于荷载较大，改用 CFG 桩，桩的直径 $d_0 = 0.5\text{m}$ ，水平桩距为 $s_x = 1.5\text{m}$ ，矩形布置。试设计 CFG 桩复合地基（按当地经验，地基土的桩侧阻力 $q_s = 10\text{kPa}$ ，端阻力 $q_p = 200\text{kPa}$ ）。

解：(1) 计算 CFG 桩复合地基的承载力

初设基础宽度为 2.0m ，布置两排桩，置换率为

$$m = \frac{2 \times \frac{\pi}{4} \times 0.5^2}{2.0 \times 1.5} = \frac{0.393}{3} = 0.131$$

按式(5-13)和式(5-14)计算复合地基的承载力：

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

$$R_a = u_p \sum q_{si} h_i + \alpha q_p A_p$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} \times 0.5^2 = 0.196(\text{m}^2)$$

计算中取 $\lambda = 0.85$ ， $\beta = 0.95$ ， $\alpha = 1.0$ ，则

$$R_a = 0.5\pi \times 10 \times 6 + 1.0 \times 200 \times 0.196 = 133.4(\text{kPa})$$

$$f_{spk} = 0.85 \times 0.131 \times \frac{133.4}{0.196} + 0.95 \times (1 - 0.131) \times 89 = 76 + 73.5 = 150(\text{kPa})$$

可见 CFG 桩复合地基承载力提高约 70% 。

(2) 确定基础宽度

$$b \geq \frac{F_k}{f_a - \bar{\gamma}d} = \frac{250}{150 - 19.6 \times 1.2} = 1.98(\text{m})$$

基础宽度选为 2.0m ，为了使条形基础的受力均匀，对称布置，由于非挤土的 CFG 桩的桩距为 $(3 \sim 5)d$ ，桩距取 $s_x = s_y = 1.5\text{m}$ 。取 300mm 砂石垫层，见图 5-15。

(3) 计算地基变形

经 CFG 桩加固后，复合地基压缩模量按式(5-9)计算：

$$E_{sp} = \zeta E_s = \frac{150}{89} \times 4 = 6.74(\text{MPa})$$

具体地基沉降计算从略。

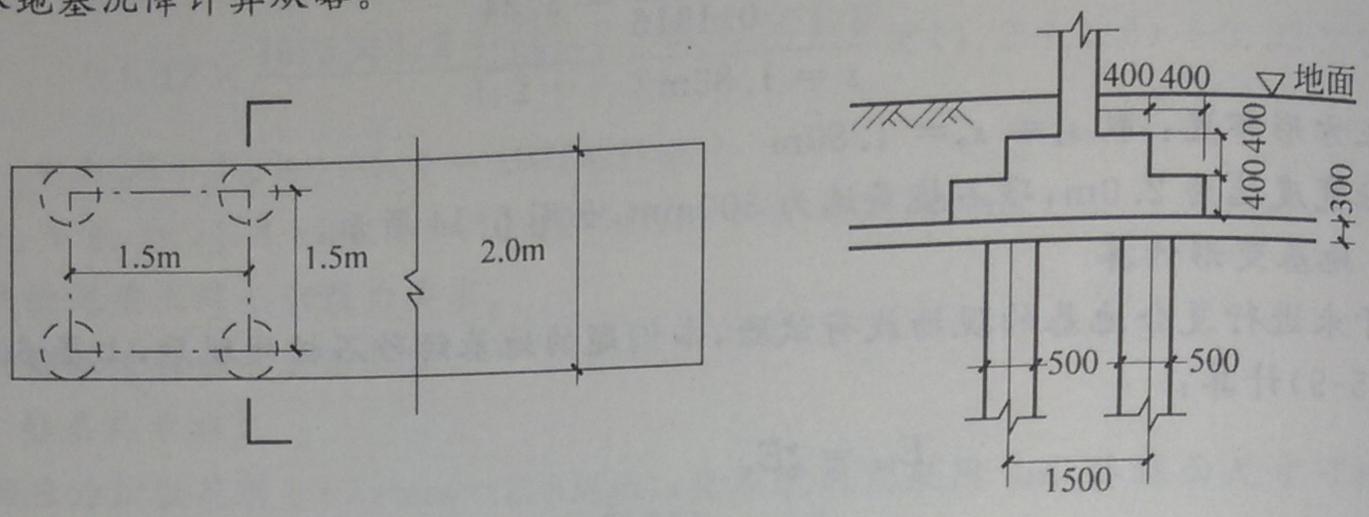


图 5-15 例 5-3 附图

5.3 加密法

5.3.1 机械压密法

利用一定的机具在土体中产生瞬时重复荷载,以克服颗粒间的阻力,使颗粒间相互移动,孔隙体积减小,密度增加,称为机械压密法。这种方法常用于大面积填土的压实和杂填土、黄土等地基的处理中。

机械压密的方法有三大类。

- (1) 碾子静重压密: 采用平碾、羊脚碾和气胎碾等机具压密。
- (2) 冲击荷重压密: 采用夯板、偏心碾和动力夯等机具压密。
- (3) 振动压密: 采用振动碾、振动板等机具压密。

三类机械压密的方法示意图 5-16。

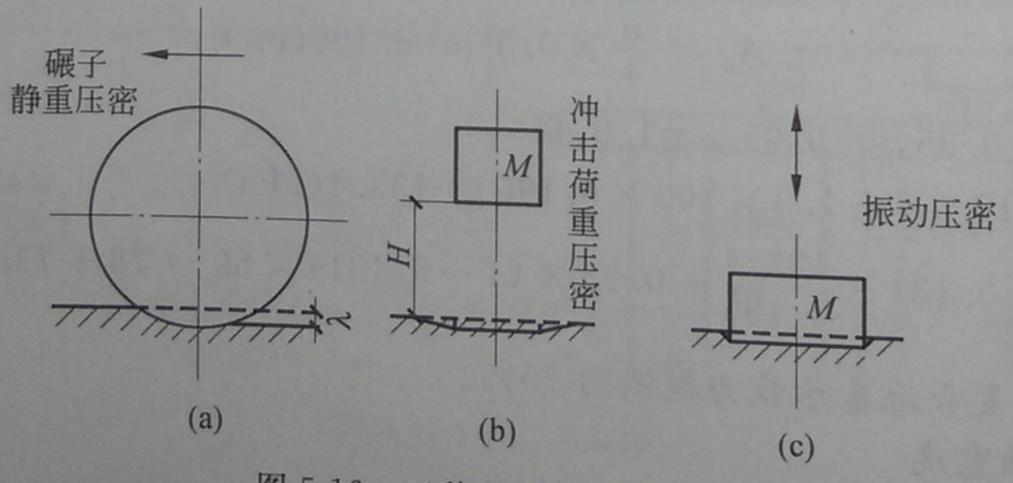


图 5-16 三种压密方法示意图

机械压密的效果取决于土的性质和机械的荷重参数。土是否容易压密与土的种类关系很大。对黏性土而言,重要影响因素是土的含水量。含水量较低的土,因为大量空气的存在,孔隙水都成毛细水,弯液面曲率大,毛细力也大,因而土粒间存在着可观的摩擦阻力,阻碍颗粒的移动,所以土不容易压密。而当含水量很大时,气体处于封闭状态,在短暂荷载作用下,水不容易排出,土也就不容易被压密。对于砂土,由于很容易排水,所以水的存在,可以减小粒间摩擦而不会影响颗粒间的相互挤密,所以压密砂土时要充分洒水。

由于设备简单、工效高,振冲法被进一步推广用于加固粉土、粉质黏土和人工填土,这时振冲法更多的是用以振冲置换,即用振冲法造孔,并在孔内投料,靠振动压密成桩,构成复合地基。所以在工程上,振冲法若以挤密原位土、提高地基承载力、减少沉降为目的时,可按上述的砂桩挤密法进行设计;若以置换为主,在地基中形成增强体以提高地基承载力,减少沉降时,则应按砂石桩复合地基设计。

选择合适的填料是振冲法设计的重要内容。回填料的作用有二:一是把振冲器的振动作用传给地基;二是填充振冲器提升后所形成的孔洞。实践证明,填料的级配,回填速度,以及向上的水流速度等对加密效果及施工速度都有重要影响。

细砂、粗砂、圆砾、碎石和炉渣都可以作为回填材料。炉渣的特点是比较便宜,但沉淀速度不如砂石材料快。理论上讲,填料粒径越粗,挤密效果越好。但颗粒太粗,容易在孔内形成拱架,阻碍填料下沉到底,故最大粒径宜控制在50mm以内。

根据实践经验建立的式(5-18)和表5-5可用来评价填料的适宜程度。

$$S = 1.7 \sqrt{\frac{3}{D_{50}^2} + \frac{1}{D_{20}^2} + \frac{1}{D_{10}^2}} \quad (5-18)$$

式中: D_{50}, D_{20}, D_{10} ——颗粒大小分析曲线上对应于50%, 20%, 10%的颗粒直径, mm;

S ——评价填料适宜性的指标, S 值越低, 填料在孔中的下沉速度越快, 振冲器提升的速率也越快, 能获得较好的压密效果。

表 5-5 填料适宜性评价

S 值	0~10	10~20	20~30	30~50	>50
填料适宜性评价	最好	好	良	差	不适宜

例 5-4 某场地为细砂地基, 天然孔隙比 $e_1 = 0.95$, $e_{\max} = 1.12$, $e_{\min} = 0.60$ 。基础埋深 1.0m, 有效覆盖压力为 18kPa。使用砂桩加密地基, 砂桩长 8.0m, 直径 $d_0 = 500$ mm, 间距 $s_a = 1.5$ m, 正三角形排列, 试计算加密后的相对密度, 并按砂土允许承载力表 2-2 估计加密后地基的允许承载力。

解 (1) 求加密后的孔隙比 e_2

按式(5-16)
$$s_a = 0.952d_0 \sqrt{\frac{1+e_1}{e_1-e_2}}$$

$$e_2 = e_1 - \frac{0.906d_0^2}{s_a^2} (1+e_1)$$

代入
$$e_2 = 0.95 - \frac{0.906 \times 0.5^2}{1.5^2} \times (1+0.95)$$

$$= 0.754$$

(2) 求地基承载力

加密后地基细砂的相对密度:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_2}{e_{\max} - e_{\min}}$$

代入
$$D_r = \frac{1.12 - 0.754}{1.12 - 0.60} = 0.704 > 0.67$$

即经砂桩加密后, 细砂已达到密实状态。查图 1-5, 当 $D_r = 0.704$, 上复压力为 18kPa 时, 标准贯入击数 $N = 10$ 。由表 2-2 查得相应的地基允许承载力 14tf/m^2 , 即 140kPa。

进一步提高真空预压的加固效果和地基承载力,目前还可以用真空预压联合碎石桩、真空预压法联合堆载等方法加固地基。

例 5-6 在例 5-5 中,如果采用排水砂井,砂井直径 $d_w = 250\text{mm}$,有效工作直径 $d_e = 2.5\text{m}$,求 20 天的固结度。

解 假定地基土为均匀等向,即 $c_{vr} = c_v$ 。

(1) 按轴对称问题求水平渗流固结度:

$$T_r = \frac{c_{vr}t}{d_e^2} = \frac{2.04 \times 10^{-6} \times 20 \times 24 \times 3600}{2.5 \times 2.5} = 0.564$$

查表 5-8,得固结度

$$U_{rt} = 0.94$$

(2) 求竖向渗流的固结度:

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} = \frac{2.04 \times 10^{-6} \times 20 \times 24 \times 3600}{10 \times 10} = 0.035$$

求得固结度

$$U_{zt} = 0.25$$

(3) 计算地基总的固结度:

按式(5-25)

$$\begin{aligned} U_t &= 1 - [(1 - U_{rt})(1 - U_{zt})] \\ &= 1 - [(1 - 0.94)(1 - 0.25)] = 0.955 \end{aligned}$$

即打砂井后只要 20 天(按瞬时加载计算)固结度就达到 95%,超过不打砂井 567 天所达到的固结度。

比较上述两个例题的计算结果,可以发现砂井对加快土层的排水固结作用很大,特别是一般沉积土层,由于水平向的固结系数常大于竖向的固结系数,砂井对加快固结速度的作用尤为明显。

5.4 胶 结 法

胶结法是通过向土中注入固化材料,或通过冰冻或焙烧使土颗粒牢固黏结在一起,从而提高土的强度,减少土的压缩性,可分为灌浆法、冷热处理法等,其中最常用的是灌浆法。

5.4.1 灌浆法

灌浆法是将某些固化材料,如水泥、石灰或其他化学材料灌入基础下一定范围内的地基岩土中,以填塞岩土中的裂缝和孔隙,防止地基渗漏,提高岩土整体性、强度和刚度的一种方法。在闸、坝、堤等挡水建筑物中,常用灌浆法构筑地基防渗帷幕,是水工建筑物的主要地基处理措施。图 5-28 是我国某土坝地基防渗处理的示意图。

灌浆法依其功能可以分成如下三类。

1. 渗透灌浆

通过灌浆孔用压力将浆液灌注入岩体的裂隙或土的孔隙中。浆液置换孔隙中的气体和

(6) 强夯法和重锤法均采用一定重量的锤从一定高度自由下落,从而对地基土进行夯击压实。其中,强夯法是通过巨大的夯击能使土体产生深层动力固结而得到密实;而重锤夯实法则是利用较小的冲击能对浅层地基土挤密。

(7) 挤密桩法是以振动、冲击或带套管等方法成孔,然后向孔中填入砂、石、土(或灰土)、石灰或其他材料,再加以振实而成为直径较大桩体的加固方法。

(8) 深层搅拌桩法是利用水泥(或石灰)等材料作为固化剂,通过特制的搅拌机械,在地基深处就地将软土和固化剂(浆液或粉体)强制搅拌,由固化剂和软土间所产生的一系列物理化学反应,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的水泥加固土,从而提高地基强度和刚度的方法。

(9) 高压喷射注浆法是利用钻机把带有喷嘴的注浆管钻进至土层的预定位置后,以高压设备使浆液或水成为 20~40 MPa 的高压射流从喷嘴中喷射而出,冲击破坏土体、同时钻杆以一定速度逐渐向上提升,将浆液和土粒强制搅拌混合,浆液凝固后,在土中形成固结体,从而加固地基的方法。

(10) 灌浆法是用液压或气压把能凝固的浆液(一般由水泥、粉煤灰或粘土等粒状浆材配制)注入有缝隙的岩土介质或物体中,以改善灌浆对象的物理力学性质,适应各类土木工程的需要的方法。

(11) 土工合成材料加筋法是指在人工填土的垫层、土坡、路堤或挡墙内铺设土工合成材料,从而提高地基承载力、减少沉降和增加稳定性的方法。

(12) 托换技术又称基础托换,其内容包括:① 解决对原有建筑物的地基处理、基础加固或增层改建的问题;② 当建筑物基础下需要修建地下工程以及在其邻近建造新建筑,使原有建筑的安全受到影响时,需采取的地基处理或基础加固措施。

思考题与习题 Questions and Exercises

8-1 地基处理方法一般分哪几类?

8-2 各种灌浆机理有什么特点?其应用条件如何?

8-3 土工聚合物在工程中的几种作用是什么?

8-4 基础加宽时,应特别注意什么问题?

8-5 某基础底面长度为 2.0 m,宽度为 1.6 m,基础埋深 $d = 1.2$ m,作用于基底的轴心荷载为 1 500 kN(含基础自重),因地基为淤泥质土,采用粗砂进行换填,粗砂容重为 20 kN/m^3 ,砂垫层厚度取 1.4 m,基底以上为填土,其容重为 18 kN/m^3 ,淤泥质土的承载力标准值 $f_k = 50 \text{ kPa}$, $\eta_b = 1.1$,试问:① 垫层厚度满足要求否?② 垫层底面的长度及宽度应多少?

8-6 某松散砂土地基的承载力标准值为 90 kPa,拟采用旋喷桩法加固。现分别用单管法、双管法和三管法进行试验,桩径分别为 1 m、1.5 m 和 2 m,单桩轴向承载力标准值分别为 200 kN、350 kN 和 620 kN,三种方法均按正方形布桩,间距为桩径的 3 倍。试分别求出加固后复合地基承载力标准值的大小。

一种方法