

第一章 地基模型 习题解答

【1-1】某住宅总压力为 70kPa，埋深 1m，淤泥质粉质粘土的天然重度为 18kN/m³，在基础埋深 1m 处用直径 ϕ 1.13m 的荷载板进行室外荷载板试验，得到表 1-3 数据，试确定该地基的基床系数。

压力 p (kPa)	0	60	79	110	135	154	184	207	235
沉降 s (mm)	0	5.21	7.39	10.87	17.60	24.56	38.25	49.33	61.93

【解】 根据式 (1-21) 有， $k_p = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1}$

式中 p_2 和 p_1 分别为基础底面计算压力和土的自重压力。故有

$$p_2 = 70 \text{ kPa}$$

$$p_1 = 18 \times 1 = 18 \text{ kPa}$$

对应的沉降由表 1-3 进行线性内插，有

$$s_1 = 0 + \frac{5.21 - 0}{60 - 0} \times (18 - 0) = 1.563 \text{ mm}$$

$$s_2 = 5.21 + \frac{7.39 - 5.21}{79 - 60} \times (70 - 60) = 6.357 \text{ mm}$$

从而有 $k_p = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} = \frac{70 - 18}{(6.357 - 1.563) \times 10^{-3}} = 10.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$

所以该地基的基床系数 $k_p = 10.8 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$

【1-2】如图 1-13 所示，某地基表面作用 $p=100\text{kPa}$ 的矩形均布荷载，基础的宽 $b=2\text{m}$ ，长 $l=4\text{m}$ ，试写出弹性半空间地基模型的刚度矩阵。矩形荷载面积等分为 4 个网格单元，变形模量 $E_0=5.0\text{MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。

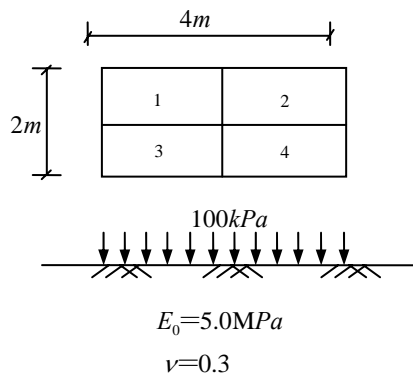


图 1-13 习题 1-2

【解】根据式(1-37)，弹性半空间地基模型的柔度系数可表示为：

$$f_{ij} = \begin{cases} \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 a} \cdot F_{ii} & (i=j) \\ \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 r} & (i \neq j) \end{cases}$$

$$\text{其中 } F_{ii} = 2 \frac{a}{b} \left\{ \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{b}{a} \ln\left[\frac{a}{b} + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1}\right] + \ln\left[1 + \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1}\right] \right\}$$

由题知， $a=1\text{m}$ ， $b=2\text{m}$ ，则

当 $i=j$ 时，

$$\begin{aligned} F_{ii} &= 2 \times \frac{1}{2} \left\{ \ln\left(\frac{2}{1}\right) + \frac{2}{1} \ln\left[\frac{1}{2} + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + 1}\right] + \ln\left[1 + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + 1}\right] \right\} \\ &= 2.406 \end{aligned}$$

$$f_{11} = \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 a} \cdot F_{ii} = \frac{1-0.3^2}{\pi \times 5.0 \times 10^3 \times 1} \times 2.406 = 1.394 \times 10^{-4}$$

$$f_{22} = f_{33} = f_{44} = f_{11} = 1.394 \times 10^{-4}$$

当 $i \neq j$ 时，

$$r_{12} = r_{21} = r_{34} = r_{43} = 2\text{m}$$

$$f_{12} = f_{21} = f_{34} = f_{43} = \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 r} = \frac{1-0.3^2}{\pi \times 5.0 \times 10^3 \times 2} = 2.897 \times 10^{-5}$$

$$r_{13} = r_{31} = r_{24} = r_{42} = 1\text{m}$$

$$f_{13} = f_{31} = f_{24} = f_{42} = \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 r} = \frac{1-0.3^2}{\pi \times 5.0 \times 10^3 \times 1} = 5.793 \times 10^{-5}$$

$$r_{14} = r_{41} = r_{23} = r_{32} = 2 \times \sqrt{1^2 + 0.5^2} = 2.236\text{m}$$

$$f_{14} = f_{41} = f_{23} = f_{32} = \frac{1-\nu^2}{\pi E_0 r} = \frac{1-0.3^2}{\pi \times 5.0 \times 10^3 \times 2.236} = 2.591 \times 10^{-5}$$

$$[f] = \begin{bmatrix} 1.394 \times 10^{-4} & 2.897 \times 10^{-5} & 5.793 \times 10^{-5} & 2.591 \times 10^{-5} \\ 2.897 \times 10^{-5} & 1.394 \times 10^{-4} & 2.591 \times 10^{-5} & 5.793 \times 10^{-5} \\ 5.793 \times 10^{-5} & 2.591 \times 10^{-5} & 1.394 \times 10^{-4} & 2.897 \times 10^{-5} \\ 2.591 \times 10^{-5} & 5.793 \times 10^{-5} & 2.897 \times 10^{-5} & 1.394 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

习 题

【2-1】 如图 2-31 所示地质土性和独立基础尺寸的资料，使用承载力公式计算持力层的承载力。若地下水位稳定由 0.7m 下降 1m，降至 1.7m 处，问承载力有何变化？

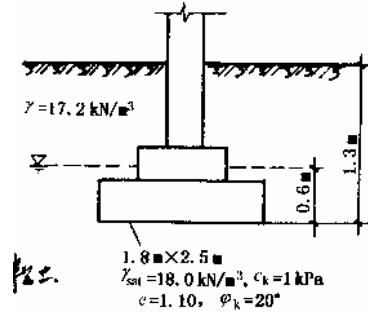


图 2-31 习题 2-1 图

解：由图 2-31 可知：
基底处取土的浮重度

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18.0 - 9.8 = 8.2 \text{ kN/m}^3$$

基底以上土的加权平均重度

$$\gamma_m = \frac{17.2 \times (1.3 - 0.6) + 8.2 \times 0.6}{1.3} = 13.0 \text{ kN/m}^3$$

由 $\phi_k = 20^\circ$ ，查表 2-6 可得

$$M_b = 0.51, M_d = 3.06, M_c = 5.66$$

所以，持力层的承载力为

$$\begin{aligned} f_a &= M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \\ &= 0.51 \times 8.2 \times 1.8 + 3.06 \times 13.0 \times 1.3 + 5.66 \times 1 \\ &= 64.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

若地下水下降 1m 至 1.7m，则

$$\text{基底以上土的重度为 } \gamma_m = 17.2 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{基底处土的重度为 } \gamma_m = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

此时，持力层的承载力为

$$\begin{aligned} f_a &= M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \\ &= 0.51 \times 18.0 \times 1.8 + 3.06 \times 17.2 \times 1.3 + 5.66 \times 1 \\ &= 86.0 \text{ kPa} \end{aligned}$$

【2-2】某砖墙承重房屋，采用素混凝土(C10)条形基础，基础顶面处砌体宽度 $b_0=490\text{mm}$ ，传到设计地面的荷载 $F_k=220\text{kN/m}$ ，地基土承载力特征值 $f_{ak}=144\text{kPa}$ ，试确定条形基础的宽度 b 。

(1)按地基承载力要求初步确定基础宽度

假定基础埋深为 $d=1.2\text{m}$ ，不考虑地基承载力深度修正，即 $f_a=f_{ak}=144\text{kPa}$

$$b \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G d} = \frac{220}{144 - 20 \times 1.2} = 1.83\text{m}, \text{取 } b=1.9\text{m}$$

初步选定条形基础的宽度为 1.9m 。

地基承载力验算：

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{b} = \frac{220 + 20 \times 1.9 \times 1.2}{1.9} = 139.8\text{kPa} < f_a = 144\text{kPa}$$

满足

无筋扩展基础尚需对基础的宽高比进行验算（其具体验算方法详见第三章），最后还需进行基础剖面设计。

(2)按台阶宽高比要求验算基础的宽度

初步选定基础的高度为 $H=300\text{mm}$

基础采用C10素混凝土砌筑，基础的平均压力为 $p_k = 139.8\text{kPa}$

查表3-2，得允许宽高比 $\text{tg}\alpha = b_2/H = 1.0$ ，则

$$b \leq b_0 + 2H\text{tg}\alpha = 0.49 + 2 \times 0.3 \times 1.0 = 1.09\text{m}$$

不满足要求

$$H \geq \frac{b - b_0}{2\text{tg}\alpha} = \frac{1.9 - 0.49}{2 \times 1.0} = 0.705\text{m}$$

取 $H=0.8\text{m}$

$$b \leq b_0 + 2H\text{tg}\alpha = 0.49 + 2 \times 0.8 \times 1.0 = 2.09\text{m}$$

此时地面离基础顶面为 $1.2 - 0.8 = 0.4\text{m} > 0.1\text{m}$ ，满足要求。

【2-3】某钢筋混凝土条形基础和地基土情况如图 2-32 所示，已知条形基础宽度 $b=1.65\text{m}$ ，上部结构荷载 $F_k=220\text{kN/m}$ ，试验算地基承载力。

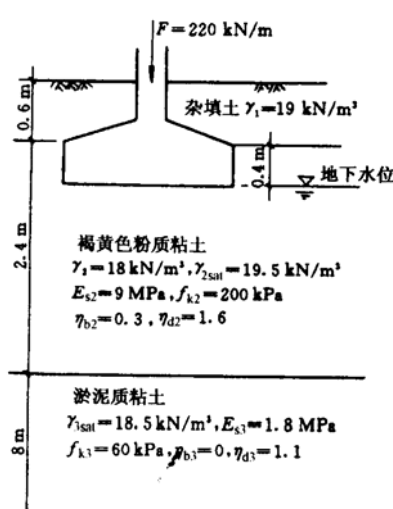


图 2-32 习题 2-3 图

解：(1)持力层承载力验算

由于 $b=1.65\text{m}<3\text{m}$ ，取 $b=3\text{m}$

$$\gamma_m = \frac{19 \times 0.6 + 18 \times 0.4}{0.6 + 0.4} = 18.6 \text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 200 + 0 + 1.6 \times 18.6 \times (1.0 - 0.5) \\ &= 214.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

而基底总压力为

$$\begin{aligned} p &= \frac{F_k + G_k}{b} = \frac{220 + 20 \times 1.65 \times 1}{1.65} \\ &= 153.3 \text{ kPa} < f_a = 214.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(2)软弱下卧层承载力验算

$$\gamma_m = \frac{19 \times 0.6 + 18 \times 0.4 + (19.5 - 9.8) \times 2.0}{0.6 + 0.4 + 2.0} = 12.7 \text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} f_{az} &= f_{ak} + \eta_d \gamma_m (d + z - 0.5) \\ &= 60 + 0 + 1.1 \times 12.7 \times (1.0 + 2.0 - 0.5) \\ &= 94.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

下卧层顶面处自重应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{cz} &= 19 \times 0.6 + 18 \times 0.4 + (19.5 - 9.8) \times 2.0 \\ &= 38 \text{ kPa} \end{aligned}$$

附加应力按扩散角计算，由于

$$E_{s2}/E_{s3} = 9/1.8 = 5, \quad z = 2.0m > 0.5b = 0.5 \times 1.65 = 0.83m$$

查表表 2-9，得 $\theta=25^\circ$ ，则

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{(p_k - \sigma_c) \cdot b}{b + 2z \cdot \operatorname{tg} \theta} \\ &= \frac{(153.3 - 19 \times 0.6 - 18 \times 0.4) \times 1.65}{1.65 + 2 \times 2 \times \operatorname{tg} 25^\circ} = 63.2kPa\end{aligned}$$

作用于下卧层顶面处得总应力为：

$$\sigma_z + \sigma_{cz} = 63.2 + 38 = 101.2kPa > f_{az} = 94.9kPa$$

所以，软弱下卧层承载力不满足。

【2-4】 某工业厂房柱基采用钢筋混凝土独立基础（图 2-33）。 $F_k=2200\text{kN}$ ，粘性土地基的承载力特征值 $f_{ak}=250\text{kPa}$ 。试确定基础底面尺寸。

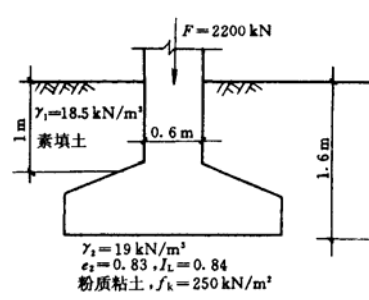


图 2-33 习题 2-4 图

【解】 (1) 按仅有轴心荷载，根据式 (2-29) 得：

$$A \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \cdot d} = \frac{2200}{250 - 20 \times 1.6} = 10.1 \text{ m}^2$$

由于基础仅作用轴心荷载，考虑选用方形基础，则

$$l = b = \sqrt{A} = \sqrt{10.1} = 3.18 \text{ m}$$

取 $l=b=3.2\text{m}$

(2) 计算修正后的地基承载力特征值

查表 2-6， $I_L=0.84 < 0.85$ ， $e=0.83 < 0.85$ ，得：

$$\eta_b = 0.3, \eta_d = 1.6$$

$$\gamma_m = \frac{18.5 \times 1 + 19 \times 0.6}{1.6} = 18.7 \text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 250 + 0.3 \times 19 \times (3.2 - 3) + 1.6 \times 18.7 \times (1.6 - 0.5) \\ &= 284.05 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(3) 地基承载力验算：

$$\begin{aligned} p_k &= \frac{F_k}{A} + \gamma_G \cdot d = \frac{2200}{3.2 \times 3.2} + 20 \times 1.6 \\ &= 246.84 \text{ kPa} < f_a = 284.05 \text{ kPa} \text{ (满足)} \end{aligned}$$

所以，基础采用 $3.2\text{m} \times 3.2\text{m}$ 底面尺寸是合适的。

【2-5】 工业厂房柱基采用钢筋混凝土独立基础，在图 2-34 中列出了荷载位置及有关尺寸，已知图示荷载： $F_k=1850\text{kN}$ ， $P_k=159\text{kN}$ ， $M_k=112\text{kN}\cdot\text{m}$ ， $Q_k=20\text{kN}$ 。粘性土的地基承载力特征值 $f_{ak}=240\text{kPa}$ 。试确定矩形基础底面尺寸（假定 $l:b=5:3$ ）。

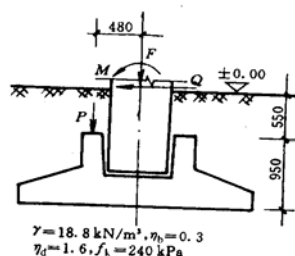


图 2-34 习题 2-5 图

【解】 (1) 按轴心荷载初步确定基础底面积，根据式 (2-29) 得：

$$A_0 \geq \frac{F_k + P_k}{f_a - \gamma_G \cdot d} = \frac{1850 + 159}{240 - 20 \times 1.5} = 9.57 \text{m}^2$$

考虑偏心荷载的影响，将 A_0 增大 10%，即

$$A = 1.1A_0 = 1.1 \times 9.57 = 10.5 \text{m}^2$$

长宽比 $l:b=5:3$ ，则 $A = l \cdot b = \frac{5}{3}b^2$ ，从而进一步有

$$b = \sqrt{\frac{A}{5/3}} = \sqrt{\frac{10.5}{5/3}} = 2.5 \text{m}$$

$$l = \frac{5}{3}b = \frac{5}{3} \times 2.5 = 4.2 \text{m}$$

(2) 计算基底最大压力 $p_{k\max}$ ：

基础及回填土重 $G_k = \gamma_G A d = 20 \times 2.5 \times 4.2 \times 1.5 = 315 \text{kN}$

基底处竖向力合力 $\sum F_k = 1850 + 159 + 315 = 2324 \text{kN}$

基底处总力矩

$$\sum M_k = 112 + 159 \times 0.48 + 20 \times 1.5 = 218 \text{kN}\cdot\text{m}$$

偏心距

$$e = \frac{\sum M_k}{\sum F_k} = \frac{218}{2324} = 0.094 \text{m} < \frac{l}{6} = \frac{4.2}{6} = 0.7 \text{m}$$

所以，偏心力作用点在基础截面内。

基底最大压力:

$$p_{k \max}^{k \min} = \frac{\sum F_k}{lb} \left(1 \pm \frac{6e}{l} \right) = \frac{2324}{2.5 \times 4.2} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.094}{4.2} \right) = \begin{cases} 251.1 \\ 191.6 \end{cases} \text{kPa}$$

(3) 地基承载力特征值及地基承载力验算:

$$\eta_b = 0.3, \eta_d = 1.6$$

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 240 + 0 + 1.6 \times 18.8 \times (1.5 - 0.5) \\ &= 270.1 \text{kPa} \end{aligned}$$

$$p_{k \max} = 251.1 \text{kPa} < 1.2 f_a = 1.2 \times 270.1 = 324.1 \text{kPa} \quad (\text{满足})$$

$$p_k = \frac{\sum F_k}{lb} = \frac{2324}{2.5 \times 4.2} = 221.3 \text{kPa} < f_a = 270.1 \text{kPa} \quad (\text{满足})$$

所以, 基础采用 $2.5\text{m} \times 4.2\text{m}$ 底面尺寸是合适的。

【例题 3-1】某承重砖墙混凝土基础的埋深为 1.5m，上部结构传来的轴向压力 $F_k=200\text{kN/m}$ 。持力层为粉质粘土，其天然重度 $\gamma=17.5\text{kN/m}^3$ ，孔隙比 $e=0.843$ ，液性指数 $I_L=0.76$ ，地基承载力特征值 $f_{ak}=150\text{kPa}$ ，地下水位在基础底面以下。试设计此基础。

【解】(1) 地基承载力特征值的深宽修正

先按基础宽度 b 小于 3m 考虑，不作宽度修正。由于持力层土的孔隙比及液性指数均小于 0.85，查表 2-7，得 $\eta_d=1.6$ 。

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_d \gamma_0 (d - 0.5) \\ &= 150 + 1.6 \times 17.5 \times (1.5 - 0.5) \\ &= 178.0 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(2) 按承载力要求初步确定基础宽度

$$b_{\min} = \frac{F_k}{f_a - \gamma_G d} = \frac{200}{(178 - 20 \times 1.5)} = 1.35 \text{ m}$$

初步选定基础宽度为 1.40 m。

(3) 基础剖面布置

初步选定基础高度 $H=0.3\text{m}$ 。大放脚采用标准砖砌筑，每皮宽度 $b_1=60\text{mm}$ ， $h_1=120\text{mm}$ ，共砌 5 皮，大放脚的底面宽度 $b_0=240+2 \times 5 \times 60=840\text{mm}$ ，如图 3-2 所示。

(4) 按台阶的宽高比要求验算基础的宽度

基础采用 C15 素混凝土砌筑，而基底的平均压力为

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{A} = \frac{200 + 20 \times 1.4 \times 1.5}{1.4 \times 1.0} = 172.8 \text{ kPa}$$

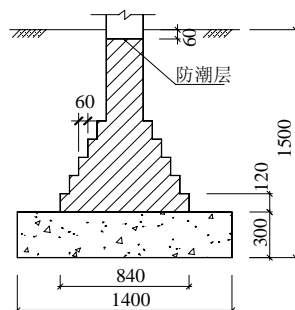


图 3-2 墙下无筋扩展基础布置

查表 3-2，得基础台阶的允许宽高比 $\tan \alpha = b_2/H = 1.0$ ，于是

$$b_{\max} = b_0 + 2Htg\alpha = 0.84 + 2 \times 0.3 \times 1.0 = 1.44 \text{ m}$$

取基础宽度为 1.4m 满足设计要求。

【例题 3-2】某厂房采用钢筋混凝土条形基础，墙厚 240mm，上部结构传至基础顶部的轴心荷载 $N=350\text{kN/m}$ ，弯矩 $M=28.0\text{kN}\cdot\text{m/m}$ ，如图 3-5 所示。条形基础底面宽度 b 已由地基承载力条件确定为 2.0m，试设计此基础的高度并进行底板配筋。

【解】(1) 选用混凝土的强度等级为 C20，查《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 得 $f_t=1.1\text{MPa}$ ；底板受力钢筋采用 HRB335 级钢筋，查得 $f_y=300\text{MPa}$ ；纵向分布钢筋采用 HPB235 级钢筋。

(2) 基础边缘处的最大和最小地基净反力：

$$p_{j\min}^{\max} = \frac{N}{b} \pm \frac{6M}{b^2} = \frac{350}{2.0} \pm \frac{6 \times 28.0}{2.0^2} \\ = \frac{217.0}{133.0} \text{ kPa}$$

(3) 验算截面 I 距基础边缘的距离：

$$b_1 = \frac{1}{2} \times (2.0 - 0.24) = 0.88 \text{ m}$$

(4) 验算截面的剪力设计值：

$$V_1 = \frac{b_1}{2b} [(2b - b_1)p_{j\max} + b_1 p_{j\min}] \\ = \frac{0.88}{2 \times 2.0} [(2 \times 2.0 - 0.88) \times 217.0 + 0.88 \times 133.0] \\ = 174.7 \text{ kN/m}$$

(5) 基础的计算有效高度：

$$h_0 \geq \frac{V_1}{0.7f_t} = \frac{174.7}{0.7 \times 1.1} = 226.9 \text{ mm}$$

基础边缘高度取 200mm，基础高度 h 取 300mm，有效高度 $h_0=300-40=260\text{mm} > 226.9\text{mm}$ ，合适。

(6) 基础验算截面的弯矩设计值：

$$M_1 = \frac{b_1^2}{6b} [p_{j\max}(3b - b_1) + p_{j\min}b_1] = \frac{0.88^2}{6 \times 2} [217 \times (3 \times 2 - 0.88) + 133 \times 0.88] = 79.3\text{kN}\cdot\text{m/m}$$

(7) 基础每延米的受力钢筋截面面积：

$$A_s = \frac{M_1}{0.9f_y h_0} = \frac{79.3}{0.9 \times 300 \times 260} \times 10^6 = 1130\text{mm}^2$$

选配受力钢筋 $\Phi 16@170$ ， $A_s=1183\text{mm}^2$ ，沿垂直于砖墙长度的方向配置。在砖墙长度方向配置 $\Phi 8@250$ 的分布钢筋。基础配筋图见图 3-6 所示。

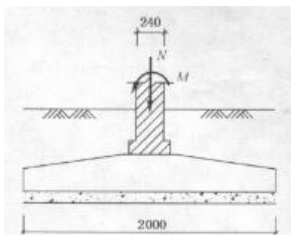


图 3-5 墙下条形基础计算简图

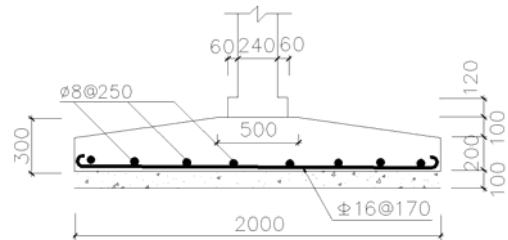


图 3-6 墙下条形基础配筋图

【例题 3-3】 某柱下锥形独立基础的底面尺寸为 $2200 \times 3000\text{mm}$ ，上部结构柱荷载的基本组合值为 $N=750\text{kN}$ ， $M=110\text{kN}\cdot\text{m}$ ，柱截面尺寸为 $400 \times 400\text{mm}$ ，基础采用 C20 级混凝土和 HPB235 级钢筋。试确定基础高度并进行基础配筋。

【解】 1. 设计基本数据：根据构造要求，可在基础下设置 100mm 厚的混凝土垫层，强度等级为 C10。

假设基础高度为 $h=500\text{mm}$ ，则基础有效高度 $h_0=0.5-0.05=0.45\text{m}$ 。从混凝土结构设计规范中可查得 C20 级混凝土 $f_t=1.1 \times 10^3\text{kPa}$ ，HPB235 级钢筋 $f_y=210\text{MPa}$ 。

2. 基底净反力计算

$$p_{j\min}^{\max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{750}{3.0 \times 2.2} \pm \frac{110}{\frac{1}{6} \times 2.2 \times 3.0^2}$$

$$= 150.0 \text{ kPa}$$

$$= 80.3 \text{ kPa}$$

3. 基础高度验算

基础短边长度 $l=2.2\text{m}$ ，柱截面的宽度和高度 $a=b_c=0.4\text{m}$ 。

$$\beta_{\text{hp}} = 1.0; \quad a_t = a = 0.4\text{m}; \quad a_b = a + 2h_0 = 1.3\text{m}$$

$$a_m = (a_t + a_b) / 2$$

$$= (0.4 + 1.3) / 2 = 0.85\text{m}$$

由于 $l > a + 2h_0$ ，于是

$$A_l = \left(\frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0 \right) l - \left(\frac{l}{2} - \frac{a}{2} - h_0 \right)^2$$

$$= \left(\frac{3.0}{2} - \frac{0.4}{2} - 0.45 \right) \times 2.2 - \left(\frac{2.2}{2} - \frac{0.4}{2} - 0.45 \right)^2 = 1.68\text{m}^2$$

$$F_l = p_{j\max} A_l = 150.0 \times 1.68 = 252\text{kN}$$

$$0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0 = 0.7 \times 1.0 \times 1.1 \times 10^3 \times 0.85 \times 0.45 = 294.5\text{kN}$$

满足 $F_l \leq 0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0$ 条件，选用基础高度 $h=500\text{mm}$ 合适。

4. 内力计算与配筋

设计控制截面在柱边处，此时相应的 a' 、 b' 和 p_{j1} 值为

$$a' = 0.4 \text{ m}, b' = 0.4 \text{ m}, a_1 = \frac{3.0 - 0.4}{2} = 1.3 \text{ m}$$

$$p_{j1} = 80.3 + (150.0 - 80.3) \times \frac{3.0 - 1.3}{3.0} = 119.8 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \text{长边方向 } M_{\text{I}} &= \frac{1}{12} a_1^2 \left[(2l + a') \left(p_{\text{max}} + p_1 - \frac{2G}{A} \right) + (p_{\text{max}} - p_1) l \right] \\ &= \frac{1}{12} \times 1.3^2 \times [(2 \times 2.2 + 0.4)(150.0 + 119.8) + (150.0 - 119.8) \times 2.2] \\ &= 191.7 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{短边方向 } M_{\text{II}} &= \frac{1}{48} (l - a')^2 (2b + b') (p_{j\text{max}} + p_{j\text{min}}) \\ &= \frac{1}{48} \times (2.2 - 0.4)^2 (2 \times 3.0 + 0.4)(150.0 + 80.3) = 99.5 \text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

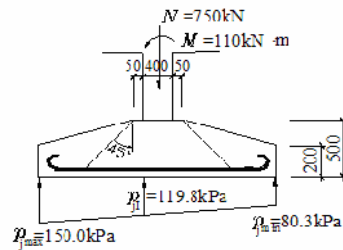
$$\text{长边方向配筋 } A_{s\text{I}} = \frac{191.7}{0.9 \times 460 \times 210} \times 10^6 = 2205 \text{ mm}^2$$

选用 $\phi 16 @ 210$ ($A_{s\text{I}} = 2211 \text{ mm}^2$)

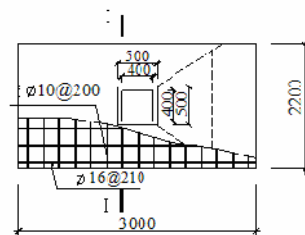
$$\text{短边方向配筋 } A_{s\text{II}} = \frac{99.5}{0.9 \times (460 - 16) \times 210} \times 10^6 = 1186 \text{ mm}^2$$

选用 $\phi 10 @ 200$ ($A_{s\text{II}} = 1178 \text{ mm}^2$)

基础的配筋布置见图 3-9 所示。



(a)



(b)

(a) 基础剖面与受力 (b) 基础配筋

图 3-9 柱下独立基础的计算与配筋

【例题 3-4】 柱下条形基础的荷载分布如图 3-11 (a) 所示, 基础埋深为 1.5m, 地基土承载力设计值 $f=160\text{kPa}$, 试确定其底面尺寸并用倒梁法计算基础梁的内力。

【解】 (1) 基础底面尺寸的确定

$$\text{基础的总长度} \quad l = 2 \times 1.0 + 3 \times 6.0 = 20.0 \text{ m}$$

$$\text{基础的宽度} \quad b = \frac{\sum N}{l(f - 20d)} = \frac{2 \times (850 + 1850)}{20 \times (160 - 20 \times 1.5)} = 2.08 \text{ m}$$

取基础宽度 $b=2.1\text{m}$ 。

(2) 计算基础沿纵向的地基净反力

$$q = bp_j = \frac{\sum N}{l} = \frac{5400}{20.0} = 270.0 \text{ kN/m}$$

采用倒梁法将条形基础视为 q 作用下的三跨连续梁, 如图 3-11(b)。

(3) 用弯矩分配法计算梁的初始内力和支座反力

$$\text{弯矩:} \quad M_A^0 = M_D^0 = 135.0 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad M_{AB\text{中}}^0 = M_{CD\text{中}}^0 = -674.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_B^0 = M_C^0 = 945.0 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad M_{BC\text{中}}^0 = -270.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{剪力:} \quad Q_{A\text{左}}^0 = -Q_{D\text{右}}^0 = 270.0 \text{ kN}; \quad Q_{A\text{右}}^0 = -Q_{D\text{左}}^0 = -675.0 \text{ kN}$$

$$Q_{B\text{左}}^0 = -Q_{C\text{右}}^0 = 945.0 \text{ kN}; \quad Q_{B\text{右}}^0 = -Q_{C\text{左}}^0 = -810.0 \text{ kN}$$

$$\text{支座反力:} \quad R_A^0 = R_D^0 = 270.0 + 675.0 = 945.0 \text{ kN}$$

$$R_B^0 = R_C^0 = 945.0 + 810.0 = 1755.0 \text{ kN}$$

(4) 计算调整荷载

由于支座反力与原柱荷载不相等, 需进行调整, 将差值折算成分布荷载 Δq :

$$\Delta q_1 = \frac{850.0 - 945.0}{(1.0 + 6.0/3)} = -31.7 \text{ kN/m}$$

$$\Delta q_2 = \frac{1850 - 1755}{(6.0/3 + 6.0/3)} = 23.75 \text{ kN/m}$$

调整荷载的计算简图见图 3-11 (c)。

(5) 计算调整荷载作用下的连续梁内力与支座反力

$$\text{弯矩: } M_A^1 = M_D^1 = -15.9 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_B^1 = M_C^1 = 24.3 \text{ kN} \cdot \text{m} ;$$

$$\text{剪力: } Q_{A左}^1 = -Q_{D右}^1 = -31.7 \text{ kN}; \quad Q_{A右}^1 = -Q_{D左}^1 = 51.5 \text{ kN}$$

$$Q_{B左}^1 = -Q_{C右}^1 = 35.7 \text{ kN}; \quad Q_{B右}^1 = -Q_{C左}^1 = -47.6 \text{ kN}$$

$$\text{支座反力: } R_A^1 = R_D^1 = -31.7 - 51.5 = -83.2 \text{ kN}$$

$$R_B^1 = R_C^1 = 35.7 + 47.6 = 83.3 \text{ kN}$$

将两次计算结果叠加:

$$R_A = R_D = R_A^0 + R_A^1 = 945.0 - 83.2 = 861.8 \text{ kN}$$

$$R_B = R_C = R_B^0 + R_B^1 = 1755 + 83.3 = 1838.3 \text{ kN}$$

这些结果与柱荷载已经非常接近, 可停止迭代计算。

(6) 计算连续梁的最终内力

$$\text{弯矩: } M_A = M_D = M_A^0 + M_A^1 = 135.0 - 15.9 = 119.1 \text{ kN} \cdot \text{m} ;$$

$$M_B = M_C = M_B^0 + M_B^1 = 945.0 + 24.3 = 969.3 \text{ kN} \cdot \text{m} ;$$

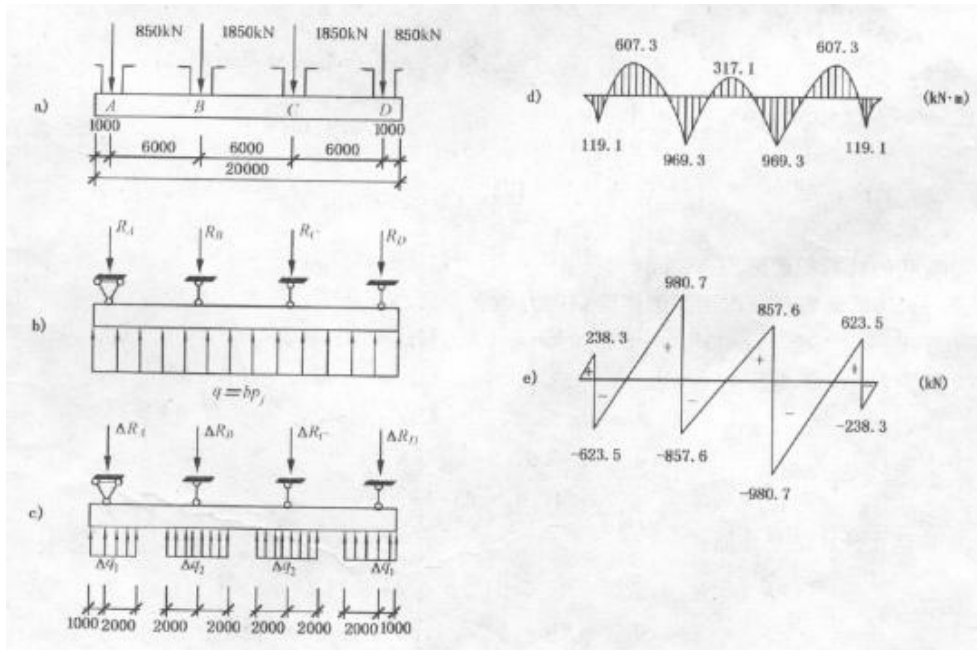
$$\text{剪力: } Q_{A左} = -Q_{D右} = Q_{A左}^0 + Q_{A左}^1 = 270.0 - 31.7 = 238.3 \text{ kN};$$

$$Q_{A右} = -Q_{D左} = Q_{A右}^0 + Q_{A右}^1 = -675.0 + 51.5 = -623.5 \text{ kN}$$

$$Q_{B左} = -Q_{C右} = Q_{B左}^0 + Q_{B左}^1 = 945.0 + 35.7 = 980.7 \text{ kN};$$

$$Q_{B右} = -Q_{C左} = Q_{B右}^0 + Q_{B右}^1 = -810.0 - 47.6 = -857.6 \text{ kN}$$

最终的弯矩与剪力见图 3-11 (d) 和图 3-11 (e)。



(a) 基础荷载分布; (b) 倒梁法计算简图; (c) 调整荷载计算简图;
(d) 最终弯矩图; (e) 最终剪力图

图 3-11 柱下条形基础计算实例

【例题 3-5】 图 3-17 为一承受对称柱荷载的条形基础，基础的抗弯刚度为 $EI = 4.3 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ ，基础底板宽度 b 为 2.5m，长度 l 为 17m。地基土的压缩模量 $E_s = 10 \text{ MPa}$ ，压缩层在基底下 5m 的范围内。用地基梁解析法计算基础梁中点 C 处的挠度、弯矩和地基的净反力。

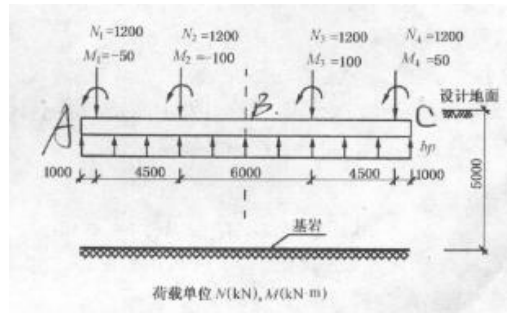


图 3-17 柱下条形基础计算图

【解】 1) 确定地基的基床系数和梁的柔度指数
 地基的附加压力近似按地基的平均净反力考虑

$$p = \frac{\sum N}{bl} = \frac{(1200 + 2000) \times 2}{2.5 \times 17} = 150.6 \text{ kPa}$$

基础中心点的沉降计算，取 $\psi_s = 1.0$ ， $z_{i-1} = 0$ ， $z_i = 5.0 \text{ m}$ ，基底中心的平均附加应力系数 C_i 则可按地基附加应力计算方法查有关表格求得为 0.6024。于是

$$s_0 = \psi_s \frac{p}{E_s} z_i C_i = 1.0 \times \frac{150.6}{10000} \times 5 \times 0.6024 = 0.0454 \text{ m}$$

查表 3-7 可求得沉降影响系数 ω_0 、 ω_m 分别为 2.31 和 2.02。

$$\text{基础的平均沉降} \quad s_m = \frac{2.02}{2.31} \times 0.0454 = 0.0397 \text{ m}$$

$$\text{基床系数} \quad k_s = \frac{150.6}{0.0397} = 3800 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{集中基床系数} \quad bk_s = 2.5 \times 3800 = 9500 \text{ kPa}$$

$$\text{柔度指数} \quad \lambda = \sqrt[4]{\frac{9500}{4 \times 4.3 \times 10^6}} = 0.1533 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda l = 0.1533 \times 17 = 2.6061, \text{ 而, } \frac{\pi}{4} = 0.7854, \pi = 3.1416$$

$\frac{\pi}{4} < \lambda l < \pi$ ，故属有限长梁。

2) 按无限长梁计算基础梁左端 A 处的内力, 见表 3-8。

3) 计算梁端的边界条件力

按 $\lambda = 2.606$ 查表 3-5 得

$$A_l = -0.02579, \quad C_l = -0.10117, \quad D_l = -0.06348$$

$$F_l = 4.04522, \quad F_l = -0.30666$$

代入式 (3-26) 得

$$\begin{aligned} P_A = P_B &= (E_l + F_l) [(1 + D_l) Q_a + \lambda(1 - A_l) M_a] \\ &= (4.04522 - 0.30666) [(1 - 0.06348) \times 729.6 + (1 + 0.02579) \times 0.1533 \times 433.9] \\ &= 2810.0 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_A = -M_B &= -(E_l + F_l) \left[(1 + C_l) \frac{Q_a}{2\lambda} + (1 - D_l) M_a \right] \\ &= -(4.04522 - 0.30666) \left[(1 - 0.10117) \times \frac{729.6}{2 \times 0.1533} + (1 + 0.06348) \times 33.9 \right] \\ &= -9721.5 \text{ kN} \end{aligned}$$

按无限长梁计算的基础梁左端 A 处内力值

表 3-8

外 荷 载	与 A 点距离 (m)	C_x	D_x	A_x	M_a (kN·m)	Q_a (kN)
$P_1=1200\text{kN}$	1.0(A点在 P_1 左边,下同)	0.71690	0.84782		$(\frac{P_0}{4\lambda} C_x \text{ 正对称})=1402.7$	$(-\frac{P_0}{2} D_x \text{ 反对称})=508.7$
$M_1=-50\text{kN}\cdot\text{m}$	1.0,		0.84782	0.97875	$(\frac{M_0}{2} D_x \text{ 反对称})=21.2$	$(-\frac{M_0\lambda}{2} A_x \text{ 正对称})=3.8$
$P_2=1200\text{kN}$	5.5	<0	>0		$(\frac{P_0}{4\lambda} C_x \text{ 正对称})=-114.6$	$(-\frac{P_0}{2} D_x \text{ 反对称})=286.2$
$M_2=-100\text{kN}\cdot\text{m}$	5.5		>0	>0	$(\frac{M_0}{2} D_x \text{ 反对称})=14.3$	$(-\frac{M_0\lambda}{2} A_x \text{ 正对称})=4.7$
$P_3=1200\text{kN}$	11.5	<0	<0		$(\frac{P_0}{4\lambda} C_x \text{ 正对称})=-656.0$	$(-\frac{P_0}{2} D_x \text{ 反对称})=-32.8$
$M_3=100\text{kN}\cdot\text{m}$	11.5		<0	>0	$(\frac{M_0}{2} D_x \text{ 反对称})=1.6$	$(-\frac{M_0\lambda}{2} A_x \text{ 正对称})=-1.0$
$P_4=1200\text{kN}$	16.0	<0	<0		$(\frac{P_0}{4\lambda} C_x \text{ 正对称})=-237.0$	$(-\frac{P_0}{2} D_x \text{ 反对称})=-39.9$
$M_4=50\text{kN}\cdot\text{m}$	16.0		<0	<0	$(\frac{M_0}{2} D_x \text{ 反对称})=1.7$	$(-\frac{M_0\lambda}{2} A_x \text{ 正对称})=1.0$ 实际计算中该项近似取 0
总 计					433.9	729.6

4) 计算 C 点处的挠度、弯矩和地基的净反力

先计算半边荷载引起C点处的内力，然后根据对称原理计算叠加得出C点处的挠度 w_C 、弯矩 M_C 和地基的净反力 p_C 见表 3-9。

外荷载与边界条件力	与 C 点距离 (m)	$M_C/2$ (kN · m)	$w_C/2$ (cm)
P_1	7.5	-312.3	0.405
M_1	7.5	-3.2	-0.004
P_2	3.0	931.2	1.365
M_2	3.0	-28.3	-0.007
P_A	8.5	-871.2	0.757
M_A	8.5	-349.3	-0.630
总 计		-633.1	1.886

于是

$$M_C = 2 \times (-633.1) = -1266.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$w_C = 2 \times 0.0189 = 0.0377 \text{ m}$$

$$p_C = k_s y_C = 3800 \times 0.0377 = 143.3 \text{ kPa} \quad .$$

第三章习题

【3-1】某砖墙承重房屋，采用C15 素混凝土条形基础，基础顶面处砌体宽度 $b_0=490\text{mm}$ ，传到设计地面处的荷载标准组合 $N_k=220\text{ kN / m}$ ，地基土的承载力特征值 $f_{ak}=120\text{kPa}$ ，基础埋深为 1.2m ，土的类型为粘性土， $e=0.75$ ， $I_L=0.65$ 。试确定此条形基础的截面尺寸并绘出基础剖面图。

解：(1) 按地基承载力要求初步确定基础宽度， $f_a = f_{ak} = 120\text{kPa}$

$$b_{\min} = \frac{N_k}{f_a - \gamma_G d} = \frac{220}{120 - 20 \times 1.2} = 2.29\text{ m}$$

初步选定基础宽度为 2.4 m 。

地基承载力验算：

$$p_k = \frac{F_k + G_k}{b} = \frac{220 + 20 \times 2.4 \times 1.2}{2.4} = 115.67\text{kPa} < f_a = 120\text{kPa}$$

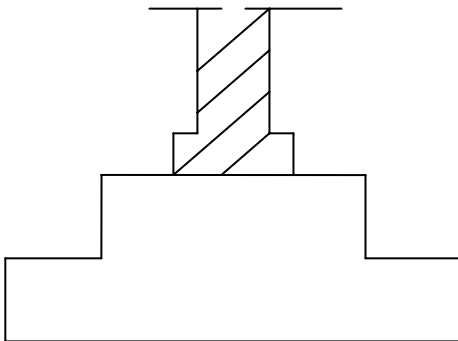
(2) 按刚性角确定基础的高度

基础采用 C15 素混凝土砌筑，基础的平均压力为 $p_k = 115.67\text{kPa}$

查表 3-2，得允许宽高比 $\text{tg}\alpha = b_2/H = 1.0$ ，则

$$H \geq \frac{b - b_0}{2\text{tg}\alpha} = \frac{2.4 - 0.49}{2 \times 1.0} = 0.96\text{m}$$

取 $H=1.0\text{m}$ ，基础剖面示意图如下：



基础剖面图

【3-2】某厂房采用钢筋混凝土条形基础，墙厚 240 mm，上部结构传至基础顶部的轴心荷载基本组合 $N=360\text{kN/m}$ ，弯矩 $M=25.0\text{kNm/m}$ ，如图 3-23。条形基础底面宽度 b 已由地基承载力条件确定为 1.8 m，试设计此基础的高度并进行底板配筋。

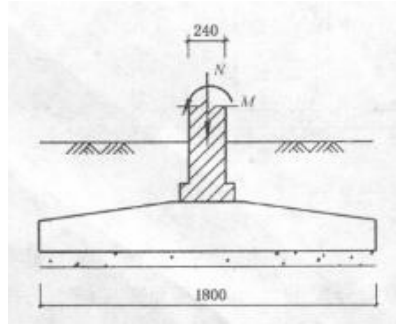


图 3-23 习题 3-2 图

【解】(1) 选用混凝土的强度等级为 C20，查《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 得 $f_t=1.1\text{MPa}$ ；底板受力钢筋采用 HRB335 级钢筋，查得 $f_y=300\text{MPa}$ ；纵向分布钢筋采用 HPB235 级钢筋。

(2) 基础边缘处的最大和最小地基净反力：

$$\begin{aligned} p_{j\max} &= \frac{N}{b} \pm \frac{6M}{b^2} = \frac{360}{1.8} \pm \frac{6 \times 25.0}{1.8^2} \\ &= \begin{matrix} 246.3 \\ 153.7 \end{matrix} \text{kPa} \end{aligned}$$

(3) 验算截面 I 距基础边缘的距离：

$$b_1 = \frac{1}{2} \times (1.8 - 0.24) = 0.78 \text{ m}$$

(4) 验算截面的剪力设计值：

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{b_1}{2b} [(2b - b_1)p_{j\max} + b_1 p_{j\min}] \\ &= \frac{0.78}{2 \times 1.8} [(2 \times 1.8 - 0.78) \times 246.3 + 0.78 \times 153.7] \\ &= 176.46 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

(5) 基础的计算有效高度：

$$h_0 \geq \frac{V_1}{0.7f_t} = \frac{176.46}{0.7 \times 1.1} = 229.17 \text{ mm}$$

基础边缘高度取 200mm，基础高度 h 取 300mm，有效高度 $h_0=300-40=260\text{mm} > 229.17\text{mm}$ ，合适。

(6) 基础验算截面的弯矩设计值:

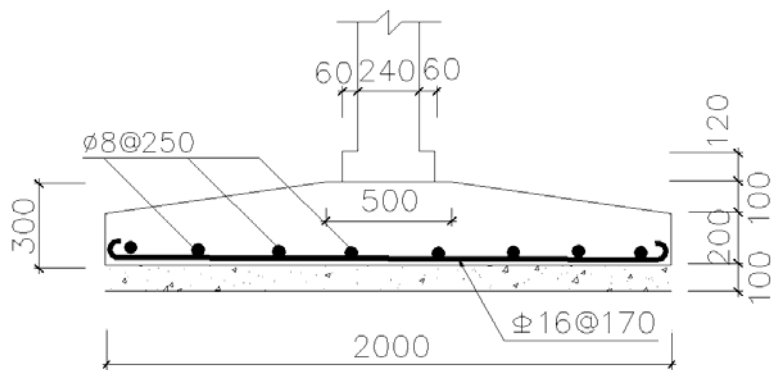
$$\begin{aligned}
 M_I &= \frac{b_1^2}{6b} [p_{j\max}(3b - b_1) + p_{j\min}b_1] \\
 &= \frac{0.78^2}{6 \times 1.8} [246.3 \times (3 \times 1.8 - 0.78) + 153.7 \times 0.78] \\
 &= 70.86 \text{ kN} \cdot \text{m/m}
 \end{aligned}$$

(7) 基础每延米的受力钢筋截面面积:

$$A_s = \frac{M_I}{0.9 f_y h_0} = \frac{70.86}{0.9 \times 300 \times 260} \times 10^6 = 1009 \text{ mm}^2$$

选配受力钢筋 $\Phi 16@170$, $A_s=1183 \text{ mm}^2$, 沿垂直于砖墙长度的方向配置。

在砖墙长度方向配置 $\phi 8@250$ 的分布钢筋。基础配筋图见图 3-6 所示。



墙下条形基础配筋图

【3-3】某工业厂房柱基采用钢筋混凝土独立基础，地基基础剖面如图 3-24 所示。已知上部结构荷载基本组合 $N=2600\text{ kN}$ ，基础采用 C20 混凝土，HRB335 级钢筋，试确定此基础的底面尺寸并进行截面验算与配筋。

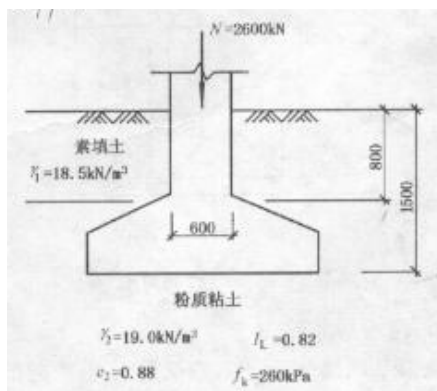


图 3-24 习题 3-3 图

【解】 1. 设计基本数据：根据构造要求，可在基础下设置 100mm 厚的混凝土垫层，强度等级为 C10。

从混凝土结构设计规范中可查得 C20 级混凝土 $f_t=1.1 \times 10^3\text{ kPa}$ ，HRB335 级钢筋 $f_y=300\text{ MPa}$ 。

2. 基础底面积尺寸确定

(1) 根据式 (2-29) 得：

$$A \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \cdot d} = \frac{2600}{260 - 20 \times 1.5} = 11.3\text{ m}^2$$

由于基础仅作用轴心荷载，考虑选用方形基础，则

$$l = b = \sqrt{A} = \sqrt{11.3} = 3.36\text{ m}$$

取 $l=b=3.4\text{ m}$

(2) 计算修正后的地基承载力特征值

查表 2-6， $I_L=0.82 < 0.85$ ， $e=0.88 < 0.85$ ，得：

$$\eta_b = 0, \eta_d = 1.0$$

$$\gamma_m = \frac{18.5 \times 0.8 + 19.0 \times 0.7}{1.5} = 18.7\text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 260 + 0 + 1.0 \times 18.7 \times (1.5 - 0.5) \\ &= 278.7\text{ kPa} \end{aligned}$$

(3) 地基承载力验算:

$$\begin{aligned} p_k &= \frac{F_k}{A} + \gamma_G \cdot d = \frac{2600}{3.4 \times 3.4} + 20 \times 1.5 \\ &= 254.91 \text{ kPa} < f_a = 278.7 \text{ kPa} \quad (\text{满足}) \end{aligned}$$

所以, 基础采用 $3.4\text{m} \times 3.4\text{m}$ 底面尺寸是合适的。

3. 基底净反力计算

$$p_j = \frac{N}{A} = \frac{2600}{3.4 \times 3.4} = 224.9 \text{ kPa}$$

4. 基础高度验算

假设基础高度为 $h=700 \text{ mm}$, 则基础有效高度 $h_0=0.7-0.04=0.66 \text{ m}$ 。
基础边长 $l=b=3.4 \text{ m}$, 柱截面的宽度和高度 $a=b_c=0.6 \text{ m}$ 。

$$\beta_{\text{hp}} = 1.0; \quad a_t = a = 0.6 \text{ m}; \quad a_b = a + 2h_0 = 1.92 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} a_m &= (a_t + a_b) / 2 \\ &= (0.6 + 1.92) / 2 = 1.26 \text{ m} \end{aligned}$$

由于 $l > a + 2h_0$, 于是

$$\begin{aligned} A_l &= \left(\frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0 \right) l - \left(\frac{l}{2} - \frac{a}{2} - h_0 \right)^2 \\ &= \left(\frac{3.4}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.66 \right) \times 3.4 - \left(\frac{3.4}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.66 \right)^2 = 1.97 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$F_l = p_j A_l = 224.9 \times 1.97 = 443 \text{ kN}$$

$$0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0 = 0.7 \times 1.0 \times 1.1 \times 10^3 \times 1.26 \times 0.66 = 640.3 \text{ kN}$$

满足 $F_l \leq 0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0$ 条件, 选用基础高度 $h=700 \text{ mm}$ 合适。

5. 内力计算与配筋

设计控制截面在柱边处, 此时相应的 a' 、 b' 和 p_{j1} 值为

$$a' = 0.6 \text{ m}, \quad b' = 0.6 \text{ m}, \quad a_1 = \frac{3.4 - 0.6}{2} = 1.4 \text{ m}$$

$$p_{j1} = p_j = 224.9 \text{ kPa}$$

正方形基础两边方向的配筋相同

$$\begin{aligned}M_1 &= \frac{1}{12} a_1^2 [(2l + a')(p_{j\max} + p_{j\text{II}}) + (p_{j\max} - p_{j\text{II}})l] \\ &= \frac{1}{12} \times 1.4^2 \times [(2 \times 3.4 + 0.6)(224.9 + 224.9) + (224.9 - 224.9) \times 3.4] \\ &= 543.66 \text{ kN} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

$$\text{配筋 } A_{s1} = \frac{543.66}{0.9 \times 660 \times 300} \times 10^6 = 3051 \text{ mm}^2$$

选用 $16\phi 16@200$ ($A_{s1}=3217 \text{ mm}^2$)

【3—4】某工业厂房柱基采用钢筋混凝土独立基础，地基基础剖面如图 3-24 所示。已知上部结构荷载基本组合 $N=2600\text{ kN}$ ， $M=450\text{ kN}\cdot\text{m}$ ，基础采用 C20 混凝土，HRB335 级钢筋，试确定此基础的底面尺寸并进行截面验算与配筋。

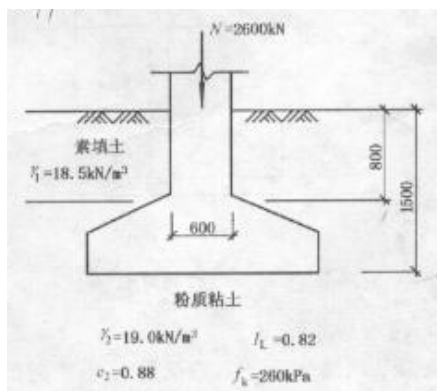


图 3-24

【解】 1. 设计基本数据：根据构造要求，可在基础下设置 100mm 厚的混凝土垫层，强度等级为 C10。

从混凝土结构设计规范中可查得 C20 级混凝土 $f_t=1.1\times 10^3\text{ kPa}$ ，HRB335 级钢筋 $f_y=300\text{ MPa}$ 。

2. 基础底面积尺寸确定

(1) 地基承载力特征值

查表 2-6， $I_L=0.82<0.85$ ， $e=0.88<0.85$ ，得：

$$\eta_b = 0, \eta_d = 1.0$$

$$\gamma_m = \frac{18.5 \times 0.8 + 19.0 \times 0.7}{1.5} = 18.7\text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 260 + 0 + 1.0 \times 18.7 \times (1.5 - 0.5) \\ &= 278.7\text{ kPa} \end{aligned}$$

(2) 按轴心荷载确定基础底面积，根据式 (2-29) 得：

$$A \geq \frac{F_k}{f_a - \gamma_G \cdot d} = \frac{2600}{278.7 - 20 \times 1.5} = 10.4\text{ m}^2$$

考虑偏心荷载的影响，将 A_0 增大 10%，即

$$A = 1.1A_0 = 1.1 \times 10.4 = 11.4\text{ m}^2$$

取短边长度 $l = 3.0\text{ m}$ ，长边长度 $b = 3.8\text{ m}$

(3) 计算基底最大压力 $p_{k \max}$:

基础及回填土重 $G_k = \gamma_G A d = 20 \times 3.0 \times 3.8 \times 1.5 = 342 \text{kN}$

基底处竖向力合力 $\sum F_k = 2600 + 342 = 2942 \text{kN}$

基底处总力矩

$$\sum M_k = 450 \text{kN} \cdot \text{m}$$

偏心距

$$e = \frac{\sum M_k}{\sum F_k} = \frac{450}{2942} = 0.15 \text{m} < \frac{l}{6} = \frac{3.8}{6} = 0.63 \text{m}$$

所以，偏心力作用点在基础截面内。

(4) 地基承载力验算：

基底平均压力

$$\begin{aligned} p_k &= \frac{\sum F_k}{A} = \frac{2942}{3.0 \times 3.8} \\ &= 258.1 \text{kPa} \end{aligned}$$

基底最大压力：

$$p_{k \max} = \frac{\sum F_k}{lb} \left(1 \pm \frac{6e}{l} \right) = \frac{2942}{3.0 \times 3.8} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0.15}{3.8} \right) = \begin{cases} 319.2 \\ 196.9 \end{cases} \text{kPa}$$

(3) 地基承载力特征值及地基承载力验算：

$$p_k = 258.1 \text{kPa} < f_a = 278.7 \text{kPa} \text{ (满足)}$$

$$p_{k \max} = 319.2 \text{kPa} < 1.2 f_a = 1.2 \times 278.7 = 334.4 \text{kPa} \text{ (满足)}$$

所以，基础采用 $3.0 \text{m} \times 3.8 \text{m}$ 底面尺寸是合适的。

3. 基底净反力计算

$$\begin{aligned} p_{j \max} &= \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{2600}{3.0 \times 3.8} \pm \frac{450}{\frac{1}{6} \times 3.0 \times 3.8^2} \\ &= \begin{matrix} 290.4 \\ 165.7 \end{matrix} \text{kPa} \end{aligned}$$

4. 基础高度验算

假设基础高度为 $h=800\text{ mm}$ ，则基础有效高度 $h_0=0.8-0.04=0.76\text{ m}$ 。

基础短边长度 $l=3.0\text{ m}$ ，柱截面的宽度和高度 $a=b_c=0.6\text{ m}$ 。

$$\beta_{\text{hp}}=1.0; \quad a_t=a=0.6\text{ m};$$

$$a_b=a+2h_0=0.6+2\times 0.76=2.12\text{ m}$$

$$\begin{aligned} a_m &= (a_t + a_b)/2 \\ &= (0.6 + 2.12)/2 = 1.36\text{ m} \end{aligned}$$

由于 $l > a + 2h_0$ ，于是

$$\begin{aligned} A_l &= \left(\frac{b}{2} - \frac{b_c}{2} - h_0 \right) l - \left(\frac{l}{2} - \frac{a}{2} - h_0 \right)^2 \\ &= \left(\frac{3.8}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.76 \right) \times 3.0 - \left(\frac{3.0}{2} - \frac{0.6}{2} - 0.76 \right)^2 = 2.33\text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$F_l = p_{j\text{max}} A_l = 290.4 \times 2.33 = 676.6\text{ kN}$$

$$0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0 = 0.7 \times 1.0 \times 1.1 \times 10^3 \times 1.36 \times 0.76 = 795.9\text{ kN}$$

满足 $F_l \leq 0.7\beta_{\text{hp}}f_t a_m h_0$ 条件，选用基础高度 $h=800\text{ mm}$ 合适。

5. 内力计算与配筋

设计控制截面在柱边处，此时相应的 a' 、 b' 和 $p_{j\text{I}}$ 值为

$$a' = 0.6\text{ m}, b' = 0.6\text{ m}, a_1 = \frac{3.8 - 0.6}{2} = 1.6\text{ m}$$

$$p_{j\text{I}} = 165.7 + (290.4 - 165.7) \times \frac{3.8 - 1.6}{3.8} = 237.89\text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \text{长边方向} \quad M_{\text{I}} &= \frac{1}{12} a_1^2 \left[(2l + a') (p_{j\text{max}} + p_{j\text{I}}) + (p_{j\text{max}} - p_{j\text{I}}) l \right] \\ &= \frac{1}{12} \times 1.6^2 \times [(2 \times 3.0 + 0.6)(290.4 + 237.89) + (290.4 - 237.89) \times 3.0] \\ &= 777.44\text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{短边方向} \quad M_{\text{II}} &= \frac{1}{48} (l - a')^2 (2b + b') (p_{j\text{max}} + p_{j\text{min}}) \\ &= \frac{1}{48} \times (3.0 - 0.6)^2 (2 \times 3.8 + 0.6)(290.4 + 165.7) = 448.8\text{ kN} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{长边方向配筋 } A_{sI} = \frac{777.44}{0.9 \times 760 \times 300} \times 10^6 = 3789 \text{ mm}^2$$

选用 $15\phi 18@230$ ($A_{sI}=3817 \text{ mm}^2$)

$$\text{短边方向配筋 } A_{sII} = \frac{448.8}{0.9 \times (760 - 16) \times 300} \times 10^6 = 2234 \text{ mm}^2$$

选用 $12\phi 16@250$ ($A_{sII}=2413 \text{ mm}^2$)

基础的配筋布置图(略)。

【3-5】 试用倒梁法计算图 3-25 所示柱下条形基础的内力。

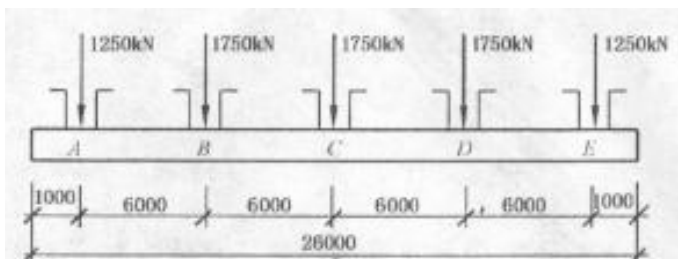


图 3-25 习题 3-5 图

【解】 (2) 计算基础沿纵向的地基净反力

$$q = \frac{\sum N}{l} = \frac{2 \times 1250 + 3 \times 1750}{26.0} = 298.1 \text{ kN/m}$$

采用倒梁法将条形基础视为 q 作用下的四跨连续梁。

(2) 用弯矩分配法计算梁的初始内力和支座反力

$$\text{弯矩: } M_A^0 = M_E^0 = 149.05 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad M_{AB\text{中}}^0 = M_{DE\text{中}}^0 = -713.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_B^0 = M_D^0 = 1107.23 \text{ kN} \cdot \text{m}; \quad M_{BC\text{中}}^0 = M_{CD\text{中}}^0 = -393.92 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_C^0 = 787.83 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{剪力: } Q_{A\text{左}}^0 = -Q_{E\text{右}}^0 = 298.1 \text{ kN}; \quad Q_{A\text{右}}^0 = -Q_{E\text{左}}^0 = -734.6 \text{ kN}$$

$$Q_{B\text{左}}^0 = -Q_{D\text{右}}^0 = 1054.0 \text{ kN}; \quad Q_{B\text{右}}^0 = -Q_{D\text{左}}^0 = -947.5 \text{ kN}$$

$$Q_{C\text{左}}^0 = -Q_{C\text{右}}^0 = 841.1 \text{ kN}$$

$$\text{支座反力: } R_A^0 = R_E^0 = 297.1 + 734.6 = 1032.7 \text{ kN}$$

$$R_B^0 = R_D^0 = 1054.0 + 947.5 = 2001.5 \text{ kN}$$

$$R_C^0 = 841.1 \times 2 = 1682.2 \text{ kN}$$

(3) 计算调整荷载

由于支座反力与原柱荷载不相等，需进行调整，将差值折算成分布荷载 Δq ：

$$\Delta q_1 = \frac{1250 - 1032.7}{(1.0 + 6.0/3)} = 72.4 \text{ kN/m}$$

$$\Delta q_2 = \frac{1750 - 2001.5}{(6.0/3 + 6.0/3)} = -62.9 \text{ kN/m}$$

$$\Delta q_3 = \frac{1750 - 1682.2}{(6.0/3 + 6.0/3)} = 17.0 \text{ kN/m}$$

(4) 计算调整荷载作用下的连续梁内力与支座反力

弯矩： $M_A^1 = M_E^1 = 36.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ； $M_{AB中}^1 = M_{DE中}^1 = -17.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$

$$M_B^1 = M_D^1 = 56.0 \text{ kN} \cdot \text{m}；\quad M_{BC中}^1 = M_{CD中}^1 = 15.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_C^1 = -9.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

剪力： $Q_{A左}^1 = -Q_{E右}^1 = 72.4 \text{ kN}$ ； $Q_{A右}^1 = -Q_{E左}^1 = -114.4 \text{ kN}$

$$Q_{B左}^1 = -Q_{D右}^1 = -95.4 \text{ kN}；\quad Q_{B右}^1 = -Q_{D左}^1 = 106.2 \text{ kN}$$

$$Q_{C左}^1 = -Q_{C右}^1 = 14.4 \text{ kN}$$

支座反力： $R_A^1 = R_E^1 = 72.4 + 114.4 = 186.8 \text{ kN}$

$$R_B^1 = R_D^1 = -(95.4 + 106.2) = -201.6 \text{ kN}$$

$$R_C^1 = 14.4 \times 2 = 28.8 \text{ kN}$$

将两次计算结果叠加：

$$R_A = R_E = R_A^0 + R_A^1 = 1032.7 + 186.8 = 1219.5 \text{ kN}$$

$$R_B = R_D = R_B^0 + R_B^1 = 2001.5 - 201.6 = 1799.9 \text{ kN}$$

$$R_C = R_C^0 + R_C^1 = 1682.2 + 28.8 = 1711.0 \text{ kN}$$

这些结果与柱荷载已经非常接近，可停止迭代计算。

(5) 计算连续梁的最终内力

弯矩: $M_A = M_E = M_A^0 + M_A^1 = 149.05 + 36.2 = 185.25 \text{ kN} \cdot \text{m} ;$

$$M_{AB中} = M_{DE中} = M_{AB中}^0 + M_{AB中}^1 = -713.31 - 17.4 = -730.71 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_B = M_D = M_B^0 + M_B^1 = 1107.23 + 56.0 = 1163.23 \text{ kN} \cdot \text{m} ;$$

$$M_{BC中} = M_{CD中} = M_{BC中}^0 + M_{BC中}^1 = -393.92 + 15.0 = -378.92$$

$$M_C = M_C^0 + M_C^1 = 787.83 - 9.8 = 778.03$$

剪力: $Q_{A左} = -Q_{E右} = Q_{A左}^0 + Q_{A左}^1 = 298.1 + 72.4 = 370.5 \text{ kN};$

$$Q_{A右} = -Q_{E左} = Q_{A右}^0 + Q_{A右}^1 = -734.6 - 114.4 = -849.0 \text{ kN}$$

$$Q_{B左} = -Q_{D右} = Q_{B左}^0 + Q_{B左}^1 = 1054.0 - 95.4 = 958.6 \text{ kN};$$

$$Q_{B右} = -Q_{D左} = Q_{B右}^0 + Q_{B右}^1 = -947.5 + 106.2 = -841.3 \text{ kN}$$

$$Q_{C左} = -Q_{C右} = Q_{C左}^0 + Q_{C左}^1 = 841.1 + 14.4 = 855.5 \text{ kN}$$

最终的弯矩与剪力图 (略)。

【3-6】 如图 3-26 所示承受对称柱荷载的钢筋混凝土条形基础的抗弯刚度 $EI = 4.3 \times 10^4 \text{MPa} \cdot \text{m}^4$ ，地基基床系数 $k = 3.8 \times 10^3 \text{kN} / \text{m}^3$ ，梁长 $l = 18 \text{m}$ ，梁底宽 $b = 2 \text{m}$ ，试计算基础中点 C 处的挠度、弯矩和基底净反力。

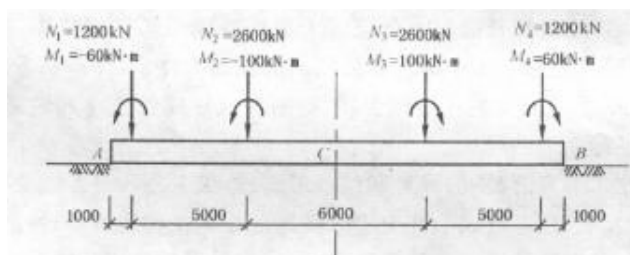


图 3-26 习题 3-6 图

(1) 确定地基的基床系数和梁的柔度指数

地基的平均净反力为

$$p = \frac{\sum N}{bl} = \frac{(1200 + 2600) \times 2}{2 \times 18} = 211.1 \text{ kPa}$$

$$\text{柔度指数} \quad \lambda = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{3800 \times 2.0}{4 \times 4.3 \times 10^7}} = 0.0815 \text{m}^{-1}$$

$\pi/4 < \lambda l = 0.0815 \times 18 = 1.467 < \pi$ 故属有限长梁。

(2) 按无限长梁计算基础梁左端 A 处的内力，见下表。

按无限长梁计算的基础梁左端 A 处内力值

外 荷 载	与 A 点距离 (m)	M_a (kN·m)	Q_a (kN)
P_1	1	3105.5	551.2
M_1	1	27.6	2.4
P_2	6	2023.1	703.9
M_2	6	27.1	3.4
P_3	12	-809.3	273.4
M_3	12	-10.5	-2.1
P_4	17	-735.0	27.7
M_4	17	-1.4	-0.7
总	计	3627.1	1559.2

(3) 计算梁端的边界条件力

按 $\lambda l = 1.467$ 查表 3-5 得

$$A_l = -0.25338, \quad C_l = -0.20534, \quad D_l = 0.02402$$

$$E_l = 5.52367, \quad F_l = -2.67759$$

代入式 (2-26) 得

$$\begin{aligned} P_A = P_B &= (E_l + F_l) \left[(1 + D_l) Q_a + \lambda (1 - A_l) M_a \right] \\ &= (5.52367 - 2.67759) \left[(1 + 0.02402) \times 1559.2 + 0.0815 \times (1 - 0.25338) \times 3627.1 \right] \\ &= 5172.3 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_A = -M_B &= -(E_l + F_l) \left[(1 + C_l) \frac{Q_a}{2\lambda} + (1 - D_l) M_a \right] \\ &= -(5.52367 - 2.67759) \times \left[(1 - 0.20534) \times \frac{1559.2}{2 \times 0.0815} + (1 - 0.02402) \times 3672.1 \right] \\ &= -31709.3 \text{ kN} \end{aligned}$$

(4) 计算 C 点处的挠度、弯矩和地基的净反力

先计算半边荷载引起 C 点处的内力，然后根据对称原理计算叠加得出 C 点处的挠度 w_C 、弯矩 M_C 和地基的净反力 p_C ，见下表。

C 点处的弯矩与挠度计算表

外荷载与边界条件力	与 C 点距离 (m)	$M_C/2$ (kN·m)	$w_C/2$ (cm)
P_1	8	-361.0	0.470
M_1	8	-12.4	-0.002
P_2	3	4548.5	1.323
M_2	3	-38.0	-0.002
P_A	9	565.0	1.881
M_A	9	-5658.7	-0.890
总 计		-234.6	2.780

于是

$$M_C = 2 \times (-234.6) = -469.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$w_C = 2 \times 0.0278 = 0.0556 \text{ m}$$

$$p_C = k_s y_C = 3800 \times 0.0556 = 211.3 \text{ kPa}$$

【3-7】承受柱荷载的钢筋混凝土条形基础如图 3-27 所示，其梁高 $h=0.6\text{m}$ ，底面宽度 $b=2.6\text{m}$ ，梁的弹性模量 $E=21000\text{MPa}$ ， $I=0.0475\text{m}^4$ ，地基基床系数 $k=22000\text{kN/m}^3$ 。试计算基础C点处的挠度、弯矩和基底净反力。

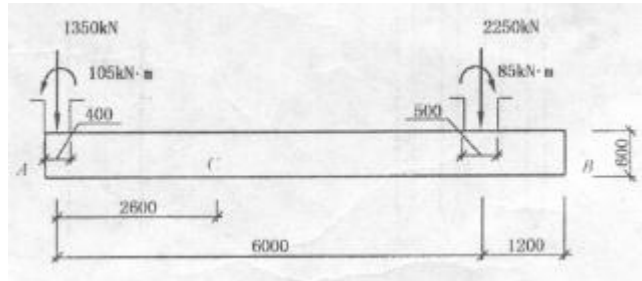


图 3-27 习题 3-7 图

【3-8】有一正方形片筏基础置于弹性地基上，片筏边长为 12.5m ，厚度为 200mm 。在板中心位置的 $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ 范围内作用 0.6N/m^2 的均布荷载，试求板的挠度。已知地基变形模量 $E_0=80\text{Mpa}$ ，泊松比 $\mu_0=0.3$ ；板的弹性模量 $E=21000\text{MPa}$ ，泊松比 $\mu=0.15$ 。

习 题

【4-1】表 4-16 给出一钻孔灌注桩试桩结果，请完成以下工作：①绘制 $Q-s$ 曲线；②在半对数纸上，绘制 $s-\lg t$ 曲线；③判定试桩的极限承载力 Q_u ，并简要说明理由；④根据试桩曲线及桩型判别该试桩破坏模式。

表 4-16 钻孔灌注桩试桩结果

Q(kN)	t(min)										
	s(mm)	0	15	30	45	60	90	120	150	180	210
800		0	0.58	0.75	0.85	0.93	0.98	1.01			
1200		1.01	1.15	1.22	1.30	1.38	1.43	1.49	1.52		
1600		1.52	1.58	1.62	1.71	1.79	1.86	1.93	1.98	2.02	
2000		2.02	2.08	2.11	2.20	2.26	2.31	2.37	2.42	2.46	
2400		2.46	2.55	2.61	2.68	2.75	2.81	2.86	2.92	2.97	3.01
2800		3.01	3.06	3.11	3.24	3.28	3.35	3.41	3.47	3.53	3.58
3200		3.62	3.73	3.88	4.01	4.06	4.10	4.16	4.22	4.27	4.33
3600		4.42	4.65	5.03	5.08	5.13	5.22	5.28	5.35	5.41	5.48
4000		5.68	6.02	6.48	6.78	6.98	7.32	7.46	7.58	7.70	7.80
4400		8.21	9.21	10.78	11.40	11.78	12.28	12.84	13.28	13.65	13.92
4800		15.22	21.80	23.82	25.02	25.86	27.0	28.70	29.60	31.40	44.00
4000				54.0		53.80					
3200				53.40		53.10					
2400				52.55		52.30					
1600				51.40		50.80					
0				48.70		47.50	46.10	45.20			

静载荷试验结果汇总表

工程名称：习题 4-1

试验桩号：

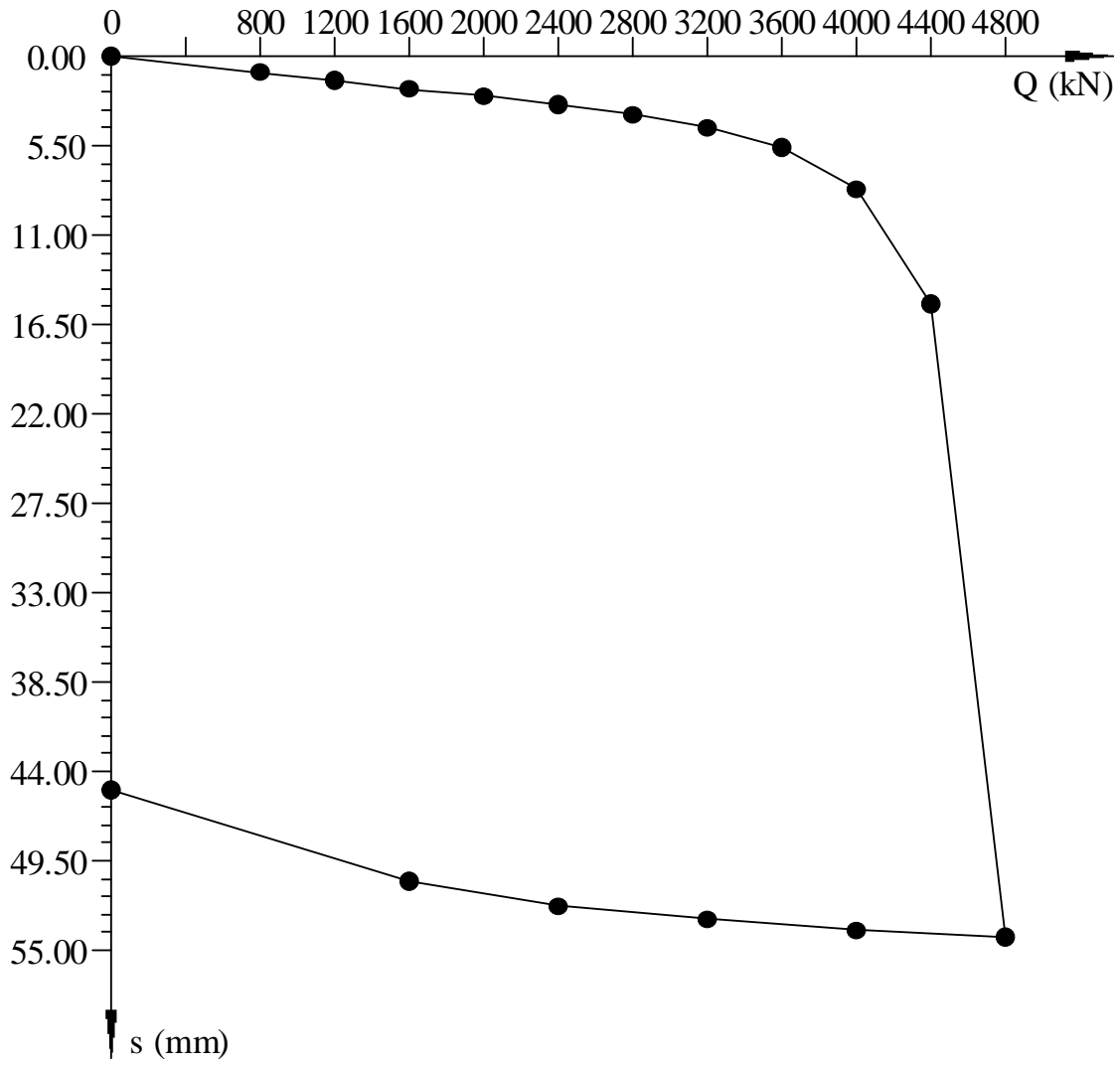
测试日期：2008-03-24

桩长：

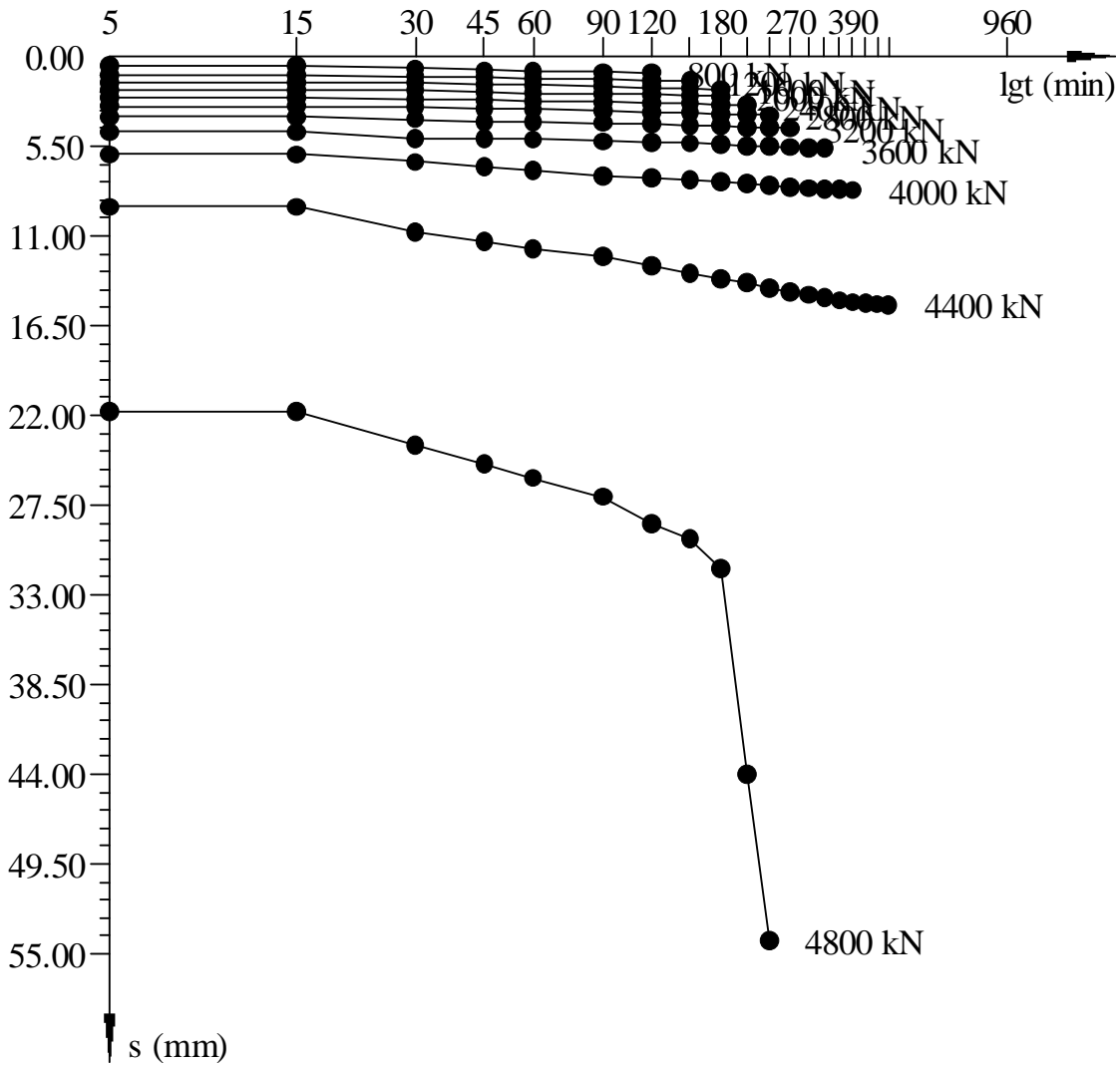
桩径：

序 号	荷 载 (kN)	历 时 (min)		沉 降 (mm)	
		本 级	累 计	本 级	累 计
0	0	0	0	0.00	0.00
1	800	120	120	1.01	1.01
2	1200	150	270	0.51	1.52
3	1600	180	450	0.50	2.02
4	2000	180	630	0.44	2.46
5	2400	210	840	0.55	3.01
6	2800	240	1080	0.61	3.62
7	3200	270	1350	0.80	4.42
8	3600	330	1680	1.26	5.68
9	4000	390	2070	2.53	8.21
10	4400	480	2550	7.01	15.22
11	4800	240	2790	38.98	54.20
12	4000	60	2850	-0.40	53.80
13	3200	60	2910	-0.70	53.10
14	2400	60	2970	-0.80	52.30
15	1600	60	3030	-1.50	50.80
16	0	120	3150	-5.60	45.20
最大沉降量：54.20 mm 最大回弹量：9.00 mm 回弹率：16.61%					

Q-s 曲线



s-lgt 曲线



极限承载力确定:

1. 由静载荷试验结果汇总表可知

$$\Delta s_8=2.53, \Delta s_9=7.01, \Delta s_{10}=38.98$$

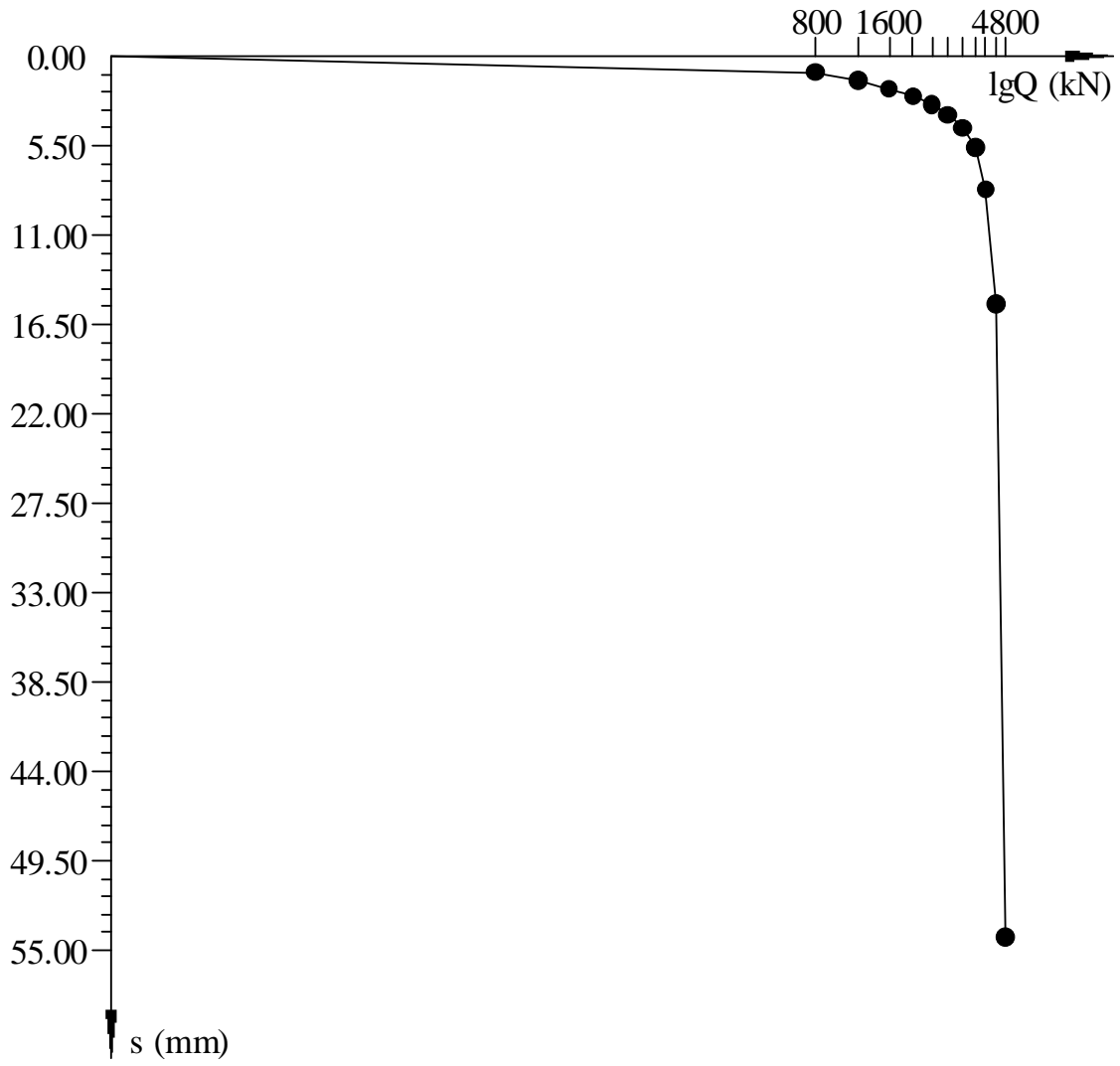
$$\text{则 } \frac{\Delta s_9}{\Delta s_8} = \frac{7.01}{2.53} = 2.8 < 5, \quad \frac{\Delta s_{10}}{\Delta s_9} = \frac{38.98}{7.01} = 5.6 > 5$$

所以 4800kN 为破坏荷载, 其前一级荷载 4400kN 为单桩极限承载力。

2. $Q-s$ 曲线为陡降型曲线, 由 $Q-s$ 曲线可见, 在荷载 4400kN 处发生明显陡降, 其明显陡降起始点对应的荷载 4400kN 为单桩极限承载力

3. 由 $s-lgt$ 曲线可见, 在当加载到 4800kN 时, $s-lgt$ 曲线尾部明显向下弯曲, 因此其前一级荷载值 4400kN 即为单桩极限承载力。

s-lgQ 曲线



【4-2】有一根悬臂钢筋混凝土预制方桩(图 4-42)，已知：桩的边长 $b=40\text{cm}$ ，入土深度 $h=10\text{m}$ ，桩的弹性模量（受弯时） $E=2\times 10^7\text{kPa}$ ，桩的变形系数 $\alpha=0.5\text{ m}^{-1}$ ，桩顶A点承受水平荷载 $Q=30\text{kN}$ 。试求：桩顶水平位移 x_A ，桩身最大弯矩 M_{\max} 与所在位置。如果承受水平力时，桩顶弹性嵌固（转角 $\varphi=0$ ，但水平位移不受约束），桩顶水平位移 x_A 又为多少？

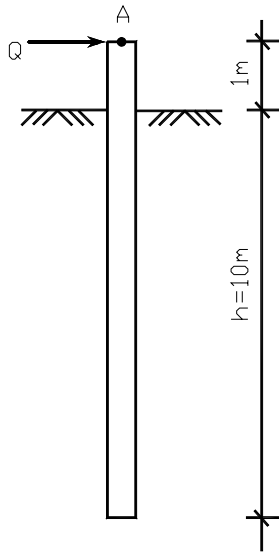


图 4-42 习题 4-2 图

解：

1) $\alpha h=0.5\times 10=5>4.0$ ，可查附表。

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \times 0.4^4 = 0.2133 \times 10^{-2} \text{m}^4$$

$$EI = 2 \times 10^7 \times 0.2133 \times 10^{-2} = 0.4267 \times 10^5 \text{kN} \cdot \text{m}^2$$

$$\alpha l_0 = 0.5 \times 1.0 = 0.5 \quad A_{x1} = 4.5635$$

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{H}{\alpha^3 EI} A_{x1} + \frac{M}{\alpha^2 EI} B_{x1} \\ &= \frac{30}{0.5^3 \times 0.4267 \times 10^5} \times 4.5635 + 0 \\ &= 0.02567 \text{m} = 25.67 \text{mm} \end{aligned}$$

地面处： $H_0 = H = 30(\text{kN})$

$$M_0 = H \cdot l_0 = 30 \times 1 = 30(\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$C_H = \frac{\alpha M_0}{H_0} = \frac{0.5 \times 30}{30} = 0.5, \text{ 得 } \alpha z = 1.1, Z_{\max} = 1.1/0.5 = 2.2(\text{m})$$

$$\text{对应的 } K_H = 1.1566, \quad M_{\max} = \frac{H_0}{\alpha} \cdot K_H = \frac{30}{0.5} \times 1.1566 = 69.4(\text{kN} \cdot \text{m})$$

2) 桩顶弹性嵌固时

$$\begin{cases} \phi_A = -\left(\frac{H}{\alpha^2 EI} A_{\phi 1} + \frac{M}{\alpha EI} B_{\phi 1}\right) = 0 \\ X_A = \frac{H}{\alpha^3 EI} A_{x1} + \frac{M}{\alpha^2 EI} B_{x1} \end{cases}$$

由 $\alpha l_0 = 0.5 \times 1.0 = 0.5$ ，查表 4-12 得：

$$A_{\phi 1} = B_{x1} = 2.6263 \quad B_{\phi 1} = 2.2506 \quad A_{x1} = 4.5635$$

由 $\phi_A = 0$ ，得桩顶的反弯弯矩：
$$M = -\frac{H \cdot A_{\phi 1}}{\alpha \cdot B_{\phi 1}} = -\frac{30 \times 2.6263}{0.5 \times 2.2506} = -70.0(kN \cdot m)$$

$$\begin{aligned} x_A &= \frac{H}{\alpha^3 EI} A_{x1} + \frac{M}{\alpha^2 EI} B_{x1} \\ &= \frac{30}{0.5^3 \times 0.4267 \times 10^5} \times 4.5635 + \frac{-70.0}{0.5^2 \times 0.4267 \times 10^5} \times 2.6263 \\ &= 0.02567 - 0.01723 = 8.44 \times 10^{-3} m = 8.44 mm \end{aligned}$$

【4-3】按例题 4-3 所给的条件，求在横向荷载作用下，多排桩的桩顶位移和桩顶荷载及桩身的最大弯距。

例 4-3 某桥墩高承台桩基础构造见图 4-37 示，采用直径为 60 厘米的钻孔灌注桩，已知：

(1)作用在承台底面中心的荷载组合：

荷载方向	垂直力 N (kN)	水平力 H (kN)	弯距 M (kN·m)
纵向（汽车行进方向）	6025	160.5	670
横向	5108	218.8	2090

(2)地基土为淤泥质粉质粘土，其主要指标为：重度 $\gamma = 18.9\text{kN/m}^3$ ；内摩擦角 $\phi = 16^\circ$ ；地基比例系数 $m = 3000\text{kN/m}^4$ 。

(3)弹性模量：抗压时 $E_{\text{压}} = 2.9 \times 10^7 \text{kPa}$ ，抗弯时 $E = 0.8E_{\text{压}}$ 。

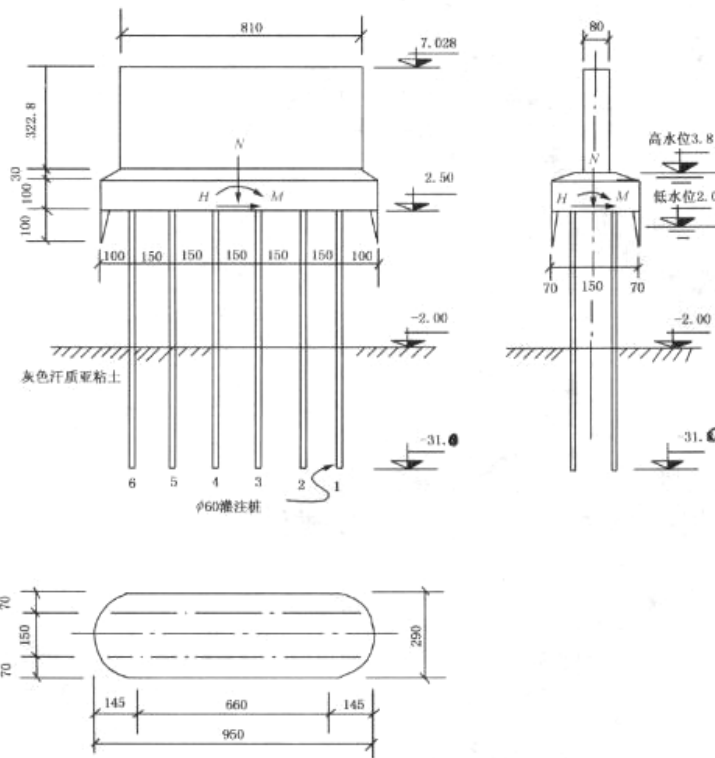


图 4-37 例题 4-3 图

解：1. 每根桩桩顶上的力 P 、 H 、 M

(1) 已知作用在每排桩的荷载（横向多排桩的桩数为 6 根。）

$$N = \frac{5108}{2} = 2554 \text{ kN}$$

$$H = \frac{218.8}{2} = 109.4 \text{ kN}$$

$$M = \frac{2090}{2} = 1045 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

(2) 求桩的计算宽度 b_1

已知 $d=0.6\text{m}$ ，查表 4-11 有

$$\text{圆形桩 } K_f = 0.9, K_0 = \left(1 + \frac{1}{d}\right) = 1 + \frac{1}{0.6} = 2.67$$

$K=1$ （由于 $d<1\text{m}$ ， $p129$ ）

$$b_1 = K_f K_0 K d = 0.9 \times 2.67 \times 0.6 = 1.44\text{m} > 2b = 2 \times 0.6 = 1.2\text{m}, \quad \text{取 } b_1 = 2b = 1.2\text{m}.$$

(3) 求桩的变形系数 α

取 $m=3000 \text{ kN/m}^4$

$$I = \frac{\pi}{64} \times 0.6^4 = 6.36 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$\text{抗弯刚度 } EI = 0.8 \times 2.9 \times 10^7 \times 6.36 \times 10^{-3} = 1.47 \times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$$

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{EI}} = \sqrt[5]{\frac{3000 \times 1.2}{1.47 \times 10^5}} = 0.49 \text{ m}^{-1}$$

桩的入土深度为 $h=31.8-2.0=29.8\text{m}$

$$\alpha h = 0.49 \times 29.8 = 14.6 > 4 \quad \text{为弹性桩。}$$

(4) 求 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 值

已知： $l_0 = 2.5+2.0=4.5\text{m}$;

对于钻挖孔桩，侧摩阻力影响系数取 $\xi = \frac{1}{2}$ （见 $p136$ ）;

$$h = 29.8\text{m}, E_{\text{压}} = 2.9 \times 10^7 \text{ kN/m}^2;$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times 0.6^2 = 0.283 \text{ m}^2;$$

$$C_0 = m_0 h = 3000 \times 29.8 = 89400 \text{ kN/m}^3.$$

侧摩阻力以 $\phi/4$ 角扩散至桩底平面的半径为 $R=0.3+29.8 \times \text{tg}(16^\circ/4)=2.38\text{m}$ ，大于桩间距 1.5 m，因此 A_0 采用相邻桩底面中心距为直径所得的面积。

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \times 1.5^2 = 1.77 \text{ m}^2$$

由式 (4-46)

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \frac{1}{\frac{l_0 + \xi h}{AE} + \frac{1}{C_0 A_0}} \\ &= \frac{1}{\frac{4.5 + \frac{1}{2} \times 29.8}{0.283 \times 2.9 \times 10^7} + \frac{1}{89400 \times 1.77}} = 1.135 \times 10^5 = 0.925 EI\end{aligned}$$

$$\alpha l_0 = 0.49 \times 4.5 = 2.2, \quad \alpha h > 4$$

查表 4-14 得: $x_H = 0.17157$, $x_m = 0.34276$, $\phi_m = 0.93788$ 。

由式 (4-48d)

$$\begin{aligned}\rho_2 &= \alpha^3 EI x_H = 0.49^3 \times 0.17157 EI = 0.0202 EI \\ \rho_3 &= \alpha^2 EI x_m = 0.49^2 \times 0.34276 EI = 0.0825 EI \\ \rho_4 &= \alpha EI \phi_m = 0.49 \times 0.93788 EI = 0.4596 EI\end{aligned}$$

(5) 求 a_0 、 b_0 、 β_0

由式 (4-52)

$$b_0 = \frac{N}{n\rho_1} = \frac{2554}{6 \times 0.925 EI} = \frac{460.18}{EI} = 3.13 \times 10^{-3} m = 3.13 mm$$

由式 (4-53)

$$\begin{aligned}a_0 &= \frac{(n\rho_4 + \rho_1 \sum x_i^2)H + n\rho_3 M}{n\rho_2(n\rho_4 + \rho_1 \sum x_i^2) - n^2 \cdot \rho_3^2} \\ &= \frac{[6 \times 0.4596 + 0.925 \times 2 \times (0.75^2 + 2.25^2 + 3.75^2)] \times 109.4 + 6 \times 0.0825 \times 1045}{[6 \times 0.0202 \times (6 \times 0.4596 + 0.925 \times 2 \times (0.75^2 + 2.25^2 + 3.75^2)) - 6^2 \times 0.0825^2] \cdot EI} \\ &= \frac{4803.51}{4.5035 EI} = \frac{1066.62}{EI} = 7.3 \times 10^{-3} m = 7.3 mm\end{aligned}$$

由式 (4-54)

$$\begin{aligned}\beta_0 &= \frac{n\rho_2 M + n\rho_3 H}{n\rho_2(n\rho_4 + \rho_1 \sum x_i^2) - n^2 \rho_3^2} \\ &= \frac{6 \times 0.0202 \times 1045 + 6 \times 0.0825 \times 109.4}{[6 \times 0.0202 \times (6 \times 0.4596 + 0.925 \times 2 \times (0.75^2 + 2.25^2 + 3.75^2)) - 6^2 \times 0.0825^2] \cdot EI} \\ &= \frac{180.81}{4.5035 EI} = \frac{40.15}{EI} = 2.7 \times 10^{-3} m = 2.7 mm\end{aligned}$$

(6) 求桩顶作用力

$$P_1 = \rho_1(b_0 + x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} + 3.75 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 564.94 \text{ kN}$$

$$P_2 = \rho_1(b_0 + x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} + 2.25 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 509.23 \text{ kN}$$

$$P_3 = \rho_1(b_0 + x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} + 0.75 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 453.52 \text{ kN}$$

$$P_4 = \rho_1(b_0 - x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} - 0.75 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 397.81 \text{ kN}$$

$$P_5 = \rho_1(b_0 - x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} - 2.25 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 342.10 \text{ kN}$$

$$P_6 = \rho_1(b_0 - x_i\beta_0) = 0.925 EI \left(\frac{460.18}{EI} - 3.75 \times \frac{40.15}{EI} \right) = 286.40 \text{ kN}$$

$$H_i = \rho_2 a_0 - \rho_3 \beta_0 = 0.0202 \times 1066.62 - 0.0825 \times 40.15 = 18.23 \text{ kN}$$

$$M_i = \rho_4 \beta_0 - \rho_3 a_0 = 0.4596 \times 40.15 - 0.0825 \times 1066.62 = -69.54 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\sum P_i = 564.94 + 509.23 + 453.52 + 397.81 + 342.10 + 286.40 = 2554 \text{ kN} = N$$

$$\sum H_i = 6 \times 18.23 = 109.38 \text{ kN} = H$$

$$\sum M_i + \sum P_i x_i = 6 \times (-69.54) + (564.94 - 286.40) \times 3.75$$

$$+ (509.23 - 342.10) \times 2.25 + (453.52 - 397.81) \times 0.75$$

$$= -417.24 + 1044.53 + 376.04 + 41.78 = 1045.11 \text{ kN}\cdot\text{m} = M$$

2. 求桩身最大弯距及桩顶位移

在地表面处 $H_0 = H_i = 18.23 \text{ kN}$

$$M_0 = M_i + H_0 \cdot l_0 = -69.54 + 18.23 \times 4.5 = 12.50 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$C_H = \alpha \cdot \frac{M_0}{H_0} = 0.49 \times \frac{12.50}{18.23} = 0.33598$$

查表 4-13 得: $\alpha z = 1.1 + \frac{0.33598 - 0.50303}{0.24563 - 0.50303} \times (1.2 - 1.1) = 1.165$

则 $z_{\max} = \frac{1.165}{0.49} = 2.378 \text{ m}$

$$K_H = 1.15666 + \frac{0.33598 - 0.50303}{0.24563 - 0.50303} \times (0.95198 - 1.15666) = 1.02382$$

$$M_{\max} = \frac{H_0}{\alpha} \cdot K_H = \frac{18.23}{0.49} \times 1.02382 = 38.09 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\text{由 } \alpha l_0 = 0.49 \times 4.5 = 2.2, \quad \alpha h = 0.49 \times 29.8 = 14.6 > 4$$

查表 4-12, 得

$$A_{x_1} = 21.59520, A_{\phi_1} = B_{x_1} = 7.89228, B_{\phi_1} = 3.95058$$

由式 (4-40)

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{H}{\alpha^3 EI} A_{x_1} + \frac{M}{\alpha^2 EI} B_{x_1} \\ &= \frac{18.23}{0.49^3 \times 1.47 \times 10^5} \times 21.59520 + \frac{12.50}{0.49^2 \times 1.47 \times 10^5} \times 7.89228 \\ &= 0.02556m = 25.56mm \\ \phi_1 &= - \left(\frac{H}{\alpha^2 EI} A_{\phi_1} + \frac{M}{\alpha EI} B_{\phi_1} \right) \\ &= - \left(\frac{18.23}{0.49^2 \times 1.47 \times 10^5} \times 7.89228 + \frac{12.50}{0.49 \times 1.47 \times 10^5} \times 3.95058 \right) \\ &= -4.762 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

【4-4】柱子传到地面的荷载为： $F = 2500\text{kN}$ ， $M = 560\text{kN}\cdot\text{m}$ ， $Q = 50\text{kN}$ 。选用预制钢筋混凝土打入桩，桩的断面为 $30\times 30\text{cm}$ ，桩长为 11.4m ，桩尖打入黄色粉质粘土内 3m 。承台底面在地面下 1.2m 处，见图 4-43。地基土层的工程地质资料如表 4-17 所示。试进行下列计算：

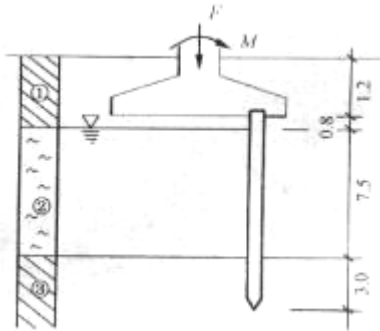


图 4-43 习题 4-4 图

- (1) 初步确定桩数及承台平面尺寸；
- (2) 进行桩顶作用效应验算；
- (3) 计算桩基沉降。

表 4-17 工程地质资料

土层编号	土层名称	厚度 (m)	重度 γ (kN/m^3)	含水率 w (%)	液限 w_L	塑限 w_P	孔隙比 e	压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	粘聚力 c_k (kPa)	内摩擦角 $\varphi_k(^{\circ})$
1	粘土	2.0	18.2	41.0	48.0	23.0	1.09	0.49	21	18
2	淤泥	7.5	17.1	47.0	39.0	21.0	1.55	0.96	14	8
3	粉质粘土	未穿透	19.6	26.7	32.7	17.7	0.75	0.25	18	20

【解】从表 4-2 中查得， $q_{pk}=2200\text{kPa}$ ；从表 4-1 查得：①层土， $I_L=0.72$ ， $q_{sk}=60\text{kPa}$ ；②层土， $q_{sk}=20\text{kPa}$ ；③层土， $I_L=0.60$ ， $q_{sk}=65\text{kPa}$ 。

(1) 单桩承载力确定

不考虑承台效应，单桩极限承载力标准值为

$$\begin{aligned} Q_{uk} &= Q_{sk} + Q_{pk} \\ &= 4 \times 0.3 \times (60 \times 0.8 + 20 \times 7.5 + 65 \times 3.0) + 2200 \times 0.3^2 \\ &= 471.6 + 198.0 = 669.6\text{kN} \end{aligned}$$

单桩承载力特征值为：

$$R_a = \frac{Q_{uk}}{K} = \frac{669.6}{2} = 334.8\text{kN}$$

(2) 桩数确定及桩平面布置

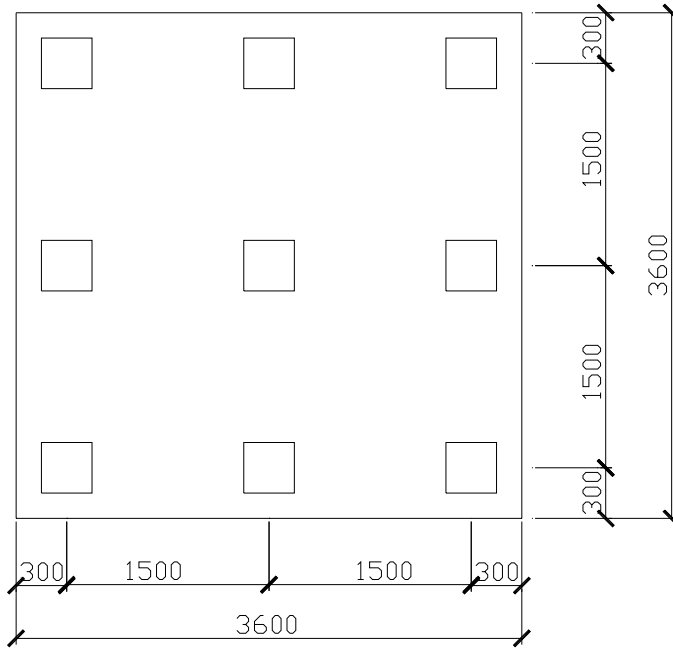
初定桩数为

$$n = \mu \frac{F + G}{R} = 1.2 \times \frac{2500}{334.8} = 8.96 \quad \text{取 } n = 9 \text{ 根}$$

由题知，钢筋混凝土打入桩，属挤土桩，桩的断面为 $30\times 30\text{cm}$ ，因此，查表 4-15 可知桩

的最小中心距为 $4.5d = 4.5 \times \sqrt{\frac{4 \times 0.3^2}{\pi}} = 1.5\text{m}$

桩平面布置及承台尺寸如图所示



(3)单桩承载力验算

承台自重为 $G_k = \gamma_G \cdot D \cdot A = 20 \times 1.2 \times 3.6^2 = 311.0 \text{ kN}$

群桩中单桩的平均受力为：

$$N = \frac{F_k + G_k}{n} = \frac{2500.0 + 311.0}{9} = 312.3 \text{ kN} < R_a = 334.8 \text{ kN}$$

群桩中单桩最大受力为：

$$N_{k \max} = \frac{F_k + G_k}{n} + \frac{M_{yk} x_{\max}}{\sum x_i^2}$$

$$= 312.3 + \frac{(560 + 50 \times 1.2) \times 1.5}{6 \times 1.5^2} = 381.2 \text{ kN} < 1.2R = 1.2 \times 334.8 = 401.8 \text{ kN}$$

群桩中单桩最小受力为：

$$N_{k \min} = \frac{F_k + G_k}{n} - \frac{M_{yk} x_{\max}}{\sum x_i^2} = 243.4 \text{ kN} > 0$$

均能满足设计要求。

(4) 桩基沉降计算

按《建筑桩基技术规范》推荐的方法

《建筑桩基技术规范》推荐的方法称作等效作用分层总和法，适用于桩中心距小于或等于 6 倍桩径的桩基，它不考虑桩基侧面应力扩散作用，将承台视作直接作用在桩端平面，即实体基础的长、宽视作等同于承台底长、宽，且作用在实体基础底面上的附加应力也取为承台底的附加应力，然后按矩形浅基础的沉降计算方法计算实体基础沉降。

$$\text{承台底附加应力: } p_0 = \frac{F_k + G_k}{A} - \gamma_0 d = \frac{2500.0 + 311.0}{3.6 \times 3.6} - 18.2 \times 1.2 = 195.1 \text{ kPa}$$

因此实体基础底面上附加应力: $p_0 = 195.1 \text{ kPa}$

按浅基础应力面积法计算的桩基沉降量

z	L/b	z/b	$\bar{\alpha}$	$z_i \bar{\alpha}_i$	$z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}$	$E_{si} = (1+e)/a_i$	$\Delta s'_i$	$\sum \Delta s'_i$
0.0	3.6/3.6 =1.0	0.0/1.8=0.0	4×0.2500 =1.0000	0.000				
7.2	1.0	7.2/1.8=4.0	4×0.1114 =0.4456	3.208	3.208	(1+0.75)/0.25 =7.00	89.4	
7.8	1.0	7.8/1.8=4.3	4×0.1054 =0.4216	3.288	0.080	7.00	2.2 ≤ 0.025×91.6 =2.3	91.6

修正系数计算

查表 4-7，桩基沉降计算经验系数 $\psi = 1.60$

$$\text{短边方向桩数: } n_b = \sqrt{n \cdot B_c / L_c} = \sqrt{9 \times 3.6 / 3.6} = 3$$

$$\text{方桩的等效直径 } d = \sqrt{\frac{4 \times 0.3^2}{\pi}} = 0.34 \text{ m}$$

距径比 $Sa/d = 1.5/0.34 \approx 4$ ，长径比 $l/d = 11.3/0.34 = 33.2$ ，承台长宽比 $L_c/B_c = 1$

$$\text{查表 4-8 得 } C_0 = 0.055 + \frac{33.2 - 30}{40 - 30} \times (0.044 - 0.055) = 0.051$$

$$C_1 = 1.477 + \frac{33.2 - 30}{40 - 30} \times (1.555 - 1.477) = 1.502$$

$$C_2 = 6.843 + \frac{33.2 - 30}{40 - 30} \times (8.261 - 6.843) = 7.297$$

桩基等效沉降系数为:

$$\psi_e = C_0 + \frac{n_b - 1}{C_1(n_b - 1) + C_2} = 0.051 + \frac{3 - 1}{1.502 \times (3 - 1) + 7.297} = 0.245$$

桩基最终沉降量为

$$\begin{aligned} S &= \psi \cdot \psi_e \cdot s' \\ &= 1.60 \times 0.245 \times 91.6 = 35.9 \text{ mm} \end{aligned}$$

习 题

【5-1】某桥墩矩形沉井基础如图 5-19 示。已知作用在基底中心的荷载 $N=21000\text{kN}$, $H=150\text{kN}$, $M=2400\text{kN}\cdot\text{m}$, H 、 M 均由活载产生。沉井平面尺寸： $a=10\text{m}$, $b=5\text{m}$ 。沉井入土深度 $h=12\text{m}$ 。试问：

(1)若已知基底粘土层的容许承载力 $[f_h]=450\text{kPa}$ ，试按浅基础及深基础两种方法分别验算其强度是否满足。

(2)如果已知沉井侧面粉质粘土的粘聚力 $c=15\text{kPa}$, $\varphi=20^\circ$, $\gamma=18\text{kN}/\text{m}^3$ ，地下水位高出地面，试验算地基的横向抗力是否满足。

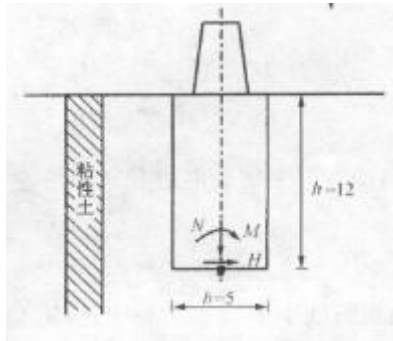


图 5-19 习题 5-1 图

解：

1. 基底应力验算

考虑井壁侧面土的弹性抗力，则按浅基础计算
由式(5-10)，基底应力计算为：

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{N}{A_0} \pm \frac{3Hd}{A\beta}$$

式中 竖向荷载 $N=21000\text{kN}$

水平力 $H=150\text{kN}$

基础底面积 $A_0=ab=10\times 5=50\text{m}^2$

计算宽度 $b_1=1.0\times\left(1+\frac{1}{a}\right)\times 1.0\times a=a+1=10+1=11\text{m}$

沉井基础入土深度 $h=12\text{m}$

水平向与竖向地基系数的比值 $\beta = \frac{C_h}{C_0} = \frac{mh}{mh} = 1.0$

(根据表4-9注, $h > 10\text{m}$, $C_0 = m_0h = mh$)

基础截面矩 $W = \frac{ab^2}{6} = \frac{1}{6}\times 10\times 5^2 = 41.67\text{m}^3$

作用高度 $\lambda = \frac{M}{H} = \frac{2400}{150} = 16\text{m}$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{b_1 \beta h^3 + 18dW}{2\beta(3\lambda - h)} \\
 &= \frac{11 \times 1.0 \times 12^3 + 18 \times 5 \times 41.67}{2 \times 1.0 \times (3 \times 16 - 12)} = 316.09 \text{m}^2 \\
 \sigma_{\max} &= \frac{N}{A_0} \pm \frac{3Hd}{A\beta} \\
 \sigma_{\min} &= \frac{21000}{50} \pm \frac{3 \times 150 \times 5}{316.09 \times 1.0} \\
 &= 420 \pm 7.12 = \begin{cases} 427.12 \text{kPa} \\ 412.88 \text{kPa} \end{cases} < [f_h] = 450 \text{kPa}
 \end{aligned}$$

如果不考虑井壁侧土的弹性抗力作用，则按浅基础计算为

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\max} &= \frac{N}{A_0} \pm \frac{M}{W} = \frac{21000}{50} \pm \frac{2400}{41.67} \\
 \sigma_{\min} &= 420 \pm 57.60 = \begin{cases} 477.60 \text{kPa} > [f_h] = 450 \text{kPa} \\ 362.40 \text{kPa} \end{cases}
 \end{aligned}$$

可以看出，考虑井壁侧土的弹性抗力作用，基底应力满足强度要求；但不考虑井壁侧土的弹性抗力作用，基底应力则不满足强度要求。

2. 横向抗力验算

在地面下深度 z 处，由式(5-8)，井壁承受的侧土横向抗力为

$$\sigma_{zx} = \frac{6H}{Ah} z(z_0 - z)$$

已知： $H = 150 \text{kN}$ ， $A = 316.09 \text{m}^2$ ， $h = 12 \text{m}$ ，

则由式(5-6)，得

$$\begin{aligned}
 z_0 &= \frac{\beta b_1 h^2 (4\lambda - h) + 6dW}{2\beta b_1 h (3\lambda - h)} \\
 &= \frac{1.0 \times 11 \times 12^2 \times (4 \times 16 - 12) + 6 \times 5 \times 41.67}{2 \times 1.0 \times 11 \times 12 \times (3 \times 16 - 12)} \\
 &= \frac{83618.1}{9504} = 8.80 \text{m}
 \end{aligned}$$

当 $z = \frac{1}{3}h = \frac{12}{3} = 4\text{m}$ 时, 则

$$\begin{aligned}\sigma_{\frac{h}{3}} &= \frac{6H}{Ah} \cdot \frac{h}{3} \cdot \left(z_0 - \frac{h}{3}\right) \\ &= \frac{6 \times 150}{316.09 \times 12} \times 4 \times (8.80 - 4) = 4.56\text{kPa}\end{aligned}$$

当 $z = h = 12\text{m}$ 时, 则

$$\begin{aligned}\sigma_{hx} &= \frac{6H}{Ah} h(z_0 - h) \\ &= \frac{6 \times 150}{316.09 \times 12} \times 12 \times (8.80 - 12) = -9.11\text{kPa}\end{aligned}$$

已知: $\gamma = 18\text{kN/m}^3$, $h = 12\text{m}$, $\varphi = 20^\circ$, $c = 15\text{kPa}$, $\eta_1 = 1.0$, $\eta_2 = 1.0$

(因 $\eta_2 = 1 - 0.8 \frac{M_g}{M}$, 已知 $M_g = 0$, 故 $\eta_2 = 1.0$)

在 $z = \frac{h}{3}$ 处地基土的极限横向抗力为:

$$\begin{aligned}[\sigma_{\frac{h}{3}}] &= \eta_1 \eta_2 \frac{4}{\cos \varphi} \left(\frac{\gamma h}{3} \text{tg} \varphi + c \right) \\ &= 1.0 \times 1.0 \times \frac{4}{\cos 20^\circ} \times \left(\frac{18 \times 12}{3} \times \text{tg} 20^\circ + 15 \right) \\ &= 175.40\text{kPa} > \sigma_{\frac{h}{3}} = 4.56\text{kPa}\end{aligned}$$

在 $z = h$ 处地基土的极限横向抗力为:

$$\begin{aligned}[\sigma_{hx}] &= \eta_1 \eta_2 \frac{4}{\cos \varphi} (\gamma h \text{tg} \varphi + c) \\ &= 1.0 \times 1.0 \times \frac{4}{\cos 20^\circ} (18 \times 12 \times \text{tg} 20^\circ + 15) \\ &= 398.50\text{kPa} > \sigma_h = 9.11\text{kPa}\end{aligned}$$

横向抗力均满足要求。

【7-2】某工程采用复合地基处理，处理后桩间土的承载力特征值 f_{sk} 为 339kPa，碎石桩的承载力特征值 f_{pk} 为 910kPa，桩径为 2m，桩中心距为 3.6m，梅花形布置。桩、土共同工作时的强度发挥系数均为 1，试求处理后复合地基的承载力特征值 f_{spk} 。

解：单桩对应的加固面积：

$$A = 6 \times \frac{1}{2} \times (2 \times 1.8 \times \tan 30^\circ) \times 1.8 = 11.22 m^2$$

桩体截面积

$$A_p = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times 2^2 = 3.14 m^2$$

复合地基桩土面积置换率

$$m = \frac{A_p}{A} = \frac{3.14}{11.22} = 0.28$$

$$\begin{aligned} f_{spk} &= m f_{pk} + \beta(1-m) f_{sk} \\ &= 0.28 \times 910 + 1.0 \times (1-0.28) \times 339 \\ &= 498.88 kPa \end{aligned}$$