

# 基础系梁对相邻基础的弯矩调节作用研究

夏宏君 张兰春

山东电力工程咨询院 山东 济南 250013

**摘要:** 通过对基础系梁及桩基抗弯刚度相关设计理论的研究, 将基础系梁对基础弯矩的调节作用进行量化, 提出有抗弯要求时基础系梁的一些设计要求, 使建筑物基础工程设计安全可靠。

**关键词:** 基础系梁; 抗弯刚度; 桩基

**中图分类号:** TU47 **文献标志码:** A

在基础工程的设计中, 经常因相邻建筑、工艺布置等诸多因素的影响, 使基础外形尺寸受到限制, 当柱脚弯矩较大时可通过在两基础间设置刚性系梁, 把偏心距  $e$  较大基础上的弯矩和剪力传至另外一个基础。一般情况下基础承台刚度较大, 在荷载作用下的挠曲变形很小, 因此柱脚的弯矩约束性能取决于基底地基的抗弯刚度, 本文通过对基础系梁和地基抗弯刚度的研究, 提出有抗弯要求时基础系梁的一些设计要求。

## 1 抗弯刚度计算

基底反力系数  $k$  通常可以反映天然地基及桩基对基础的作用力-变形关系, 天然地基及桩基的抗压刚度可近似根据静载荷试验进行确定, 在  $P-S$  曲线上近似直线段取  $p_1$ 、 $p_2$ , 得相应的沉降值  $s_1$ 、 $s_2$ 。根据太沙基的研究, 对于矩形基础, 当基础长边  $L$  与宽度  $b$  的比值为  $m$  时,  $k$  应按下式计算。

$$k = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \times \frac{m + 0.5}{1.5m} \quad (1)$$

### 1.1 天然地基的抗弯刚度

文献[1]对地基的动刚度特性和计算有比较详细的规定, 可根据其计算理论, 采用基底反力系数  $K$  替代天然地基的抗压动刚度系数  $C_z$ (见表 1)进行计算, 但以下各表达式仍以  $C_z$  表示。

天然地基的抗弯刚度系数:

$$C_\varphi = 2.15 C_z \quad (2)$$

天然地基的抗压刚度:

$$K_z = C_z A \quad (3)$$

天然地基的抗弯刚度:

$$K_\varphi = C_\varphi I \quad (4)$$

式中:  $K_\varphi$  为天然地基抗弯刚度,  $kN \cdot m$ ;  $I$  为基础底面通过其形心轴的惯性矩,  $m^4$ 。

表 1

各地基动刚度系数表

地基特征	土的种类	$C_z/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
松软土	流动沙土, 软化湿土, 新填土	1000~5000
	流塑粘性土, 淤泥及淤泥质土, 有机质土	5000~10000
中等密实土	粘土及亚粘土: 软塑的	10000~20000
	粘土及亚粘土: 可塑的	20000~40000
	轻亚粘土: 软塑的	10000~30000
	轻亚粘土: 可塑的	30000~50000
	砂土: 轻散或稍密的	10000~15000
	砂土: 中密的	15000~25000
	砂土: 密实的	25000~40000
	碎石土: 稍密的	15000~25000
	碎石土: 中密的	25000~40000
	黄土及黄土亚粘土	40000~50000
密实土	硬塑粘土及粘土	40000~100000
	硬塑轻亚土	50000~100000
	密实碎石土	50000~100000
极密实土	人工压实的填亚粘土, 硬粘土	100000~200000
坚硬土	冻土层	200000~1000000
岩石	软质岩石, 中等风化或强风化的硬岩石	200000~1000000
	微风化的硬岩石	1000000~15000000
桩基	弱土层内的摩擦桩	10000~50000
	穿过弱土层达密实砂层或粘土性土层桩	5000~150000
	打至岩层的支承桩	8000000

## 1.2 桩基础的抗弯刚度

预制桩或打入式灌注桩的抗压、抗弯刚度分别按下式计算:

桩基抗弯刚度

$$K_{p\phi} = k_{pz} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (5)$$

单桩的抗压刚度

$$k_{pz} = \sum C_{p\tau} A_{p\tau} + C_{pz} A_p \quad (6)$$

式中： $r_i$  为第  $i$  根桩的轴线至基础底面形心回转轴的距离， $m$ ； $C_{p\tau}$  为桩周各层土的当量抗剪刚度系数， $kN/m^3$ ； $A_{p\tau}$  为各层土中的桩周表面积， $m^2$ ； $C_{pz}$  为桩尖土的当量抗压刚度系数， $kN/m^3$ ； $A_p$  为桩的截面积， $m^2$ 。 $k_{pz}$  为单桩抗压刚度，通过  $p$ - $s$  曲线计算。

## 2 天然地基、桩基、系梁抗弯体系探讨

### 2.1 符合柱脚固接假定的相对抗弯刚度

“冶金建筑抗震规范”中要求，“基础梁的抗弯劲度应不小于框架柱劲度的 2 倍。”而文献[3]指出，“当桩柱截面之比大于 2 时，桩的抗弯刚度相当于柱的 16 倍以上，当柱脚剪力、弯矩不太大的情况下，单桩基础实现自身平衡而不致产生大的变位，其力学模型也符合结构内力分析时柱底为固端的假定。”两者相差较大，因此做如下推导。

通过相关推导可知，要使柱顶达到完全刚结的承载力  $M_A = 4EI/L$  成立，则柱脚应有  $M = 2EI/L$  的承载力，满足刚接时的柱脚变位必须很小。当  $M_A \approx 95\%(4EI\theta/L)$  时， $M_B = 80\%(2EI\theta/L)$  得  $K_b/K_c=16$ ，由此可知，柱脚刚接假定近似的柱脚抗弯刚度应不小于柱抗弯线刚度的 16 倍，与文献[3]条文说明一致。

当相邻基础间设置系梁时，柱脚较大的剪力、弯矩也不致引起单桩和基础产生较大变位，因此满足柱脚刚接时地基抗弯刚度的判别式为

$$\frac{K_{p\phi}}{K_c} \geq 16 \text{ 或 } \frac{K_\phi + K_l}{K_c} \geq 16 \quad (7)$$

### 2.2 天然地基上基础系梁的抗弯刚度计算

在偏心荷载作用下，天然地基的破坏有两种形式：对于承载力特征值较高的地基以  $p_{\min} < 0$  为主，由于不存在地基破坏的可能性，此时仅需满足柱脚刚接的上部计算假定，即

$$\frac{K_l}{K_c} = \frac{E_l I_l L_c}{E_c I_c L_l} \geq 16 \quad (8)$$

式中： $K_l$ 、 $E_l$ 、 $I_l$ 、 $L_l$  分别为基础系梁在柱脚的抗弯刚度、弹性模量、系梁截面惯性距、相邻柱间距。 $K_c$ 、 $E_c$ 、 $I_c$ 、 $L_c$  分别为柱脚抗弯刚度、弹性模量、垂直系梁方向柱截面惯性距、底层柱计算长度。

当为承载力特征值较低的软土类地基时，基底应力以  $p_{\max} > 1.2f_a$  为主。此时不仅要求满足柱脚刚接的计算假定，并且应在竖向荷载与地基分担弯矩共同作用下满足  $p_{\max} < 1.2f_a$  的地基承载力要求。因此，需要对地基、柱及基础系梁的抗弯刚度进行综合考虑，即

$$\frac{K_l + K_\phi}{K_c} \geq 16 \quad (9)$$

尚应满足

$$\frac{K_{\phi}}{K_l} M_0 \leq (1.2 f_a - \frac{F_k + G_k}{A}) W_d \quad (10)$$

式中： $K_{\phi}$  为天然地基的抗弯刚度； $I_d$  为绕与系梁垂直方向的基础形心的基础底面惯性矩； $M_0$  为柱脚设计弯矩。 $f_a$  为修正后的地基承载力特征值； $A$  为基础底面面积； $F_k$  为相应于荷载效应标准组合时，上部结构传至基础顶面的竖向力值； $G_k$  为基础自重和基础上的土重； $W_d$  为基础底面的抵抗矩， $W_d = \frac{a_d b_d^2}{6}$ 。

对于软弱地基而言，基础系梁兼具调节地基不均匀沉降的作用，因此软弱地基上基础系梁的最小刚度判别式为

$$K_l \geq \frac{0.5 C_{\phi} M_0 b_d}{1.2 f_a - \frac{F_k + G_k}{A}} \quad (11)$$

此时尚应满足式 (9)。

基础系梁的配筋可按对称配筋的矩形截面偏心受拉构件计算，系梁配筋简化计算公式为

$$A'_s = A_s = \frac{M_0}{f_y (h_0 - a_s)} \left( \frac{K_l}{K_{\phi} + K_l} \right) \quad (12)$$

### 2.3 桩基础系梁的抗弯刚度计算

文献[3]规定了普通基础系梁的设计要求：宽度不宜小于 200mm，其高度可取承台中心距的 1/10~1/15；以柱底剪力或柱轴力的 1/10 作用于系梁两端，按受压确定截面尺寸，按受拉确定配筋。但没有考虑柱脚弯矩对基础系梁的影响。表 2 为某电厂汽机房运转层平台柱脚荷载，相邻柱距为 6.0m，按文献[3]则基础系梁截面可取 350×600，计算荷载可取剪力  $V_{xmax}=104.7\text{kN}$ ，或者取  $0.1N_{max}=0.1 \times 1152.9 \approx 115.3$  与  $V_{xmax}$  接近，按受压计算时仅需构造配筋 4Φ12，按受拉计算需配筋约为 4Φ14。而计入柱脚弯矩后按对称配筋偏拉构件计算配筋为上下各 7Φ25，由此可见，按文献[3]对需要利用抗弯能力的基础系梁进行设计时，使设计结果不安全。

表 2 某工程平台柱柱脚内力一览表（抗震等级为 III 级）

组合条件	$V_x/\text{kN}$	$V_y/\text{kN}$	轴力 $N/\text{kN}$	$M_x/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_y/\text{kN} \cdot \text{m}$
$V_{xmax}$	104.7	59.7	-1068.4	-339.5	546.3
$V_{ymax}$	5.5	63.5	-1125.2	-365.8	-13.4
$N_{min}$	28.6	-59	-613.8	348.8	127.0
$N_{max}$	25.4	3.1	-1152.9	-12.5	86.4
$M_{xmax}$	5.5	63.5	-1125.2	-365.8	-13.4
$M_{ymax}$	104.7	59.7	-1068.4	-339.5	546.3
恒+活	25.4	3.1	-1152.9	-12.5	86.4

通常情况下，桩顶嵌入承台的长度为 100mm 左右，桩顶主筋锚入承台 30d，这种连接方式既可以传

递剪力，又能传递一部分弯矩，介于铰接与刚接之间<sup>[3]</sup>。桩基工程设计中，桩顶与承台连接基本与此相符，为了便于计算，桩顶处的抗弯作用可以不予考虑，将其作为基底抗弯、抗水平作用的储备。因此对于单桩及单排桩的短向的基础系梁的刚度和受力应分别满足式（11）和式（12）。

$$A_s' = A_s = \frac{M_0}{f_y(h_0 - a_s)} + \frac{V}{2f_y} \quad (13)$$

其中， $x_i, y_i$  分别为桩  $i$  至桩群形心  $y、x$  轴线的距离。

### 3 基础系梁设计举例

某电厂汽机房加热器平台一柱脚荷载如表 2 所示，底层柱计算长度已知  $L_c=12.5m$ ，在汽轮发电机基座附近有一基础尺寸受基座底板影响，平面布置如图 1 所示。采用两桩基础，单桩承载力特征值  $R_a = 1000 kN$ ，桩顶锚入承台内 100mm。以表 2 中  $V_{max}$  荷载组对 X 方向系梁进行设计： $K_i \geq 16K_c$ ，设  $a_i = 0.80 m$ ，得  $b_i = 1.32 m$  取  $b_i = 1.35m$ ，代入式（13）求得配筋  $A_s' = A_s = 2039mm^2$  小于最小配筋率，按构造配筋。

通过上面算例可知：基础系梁截面尺寸通常以刚度控制为主，配筋按构造要求。

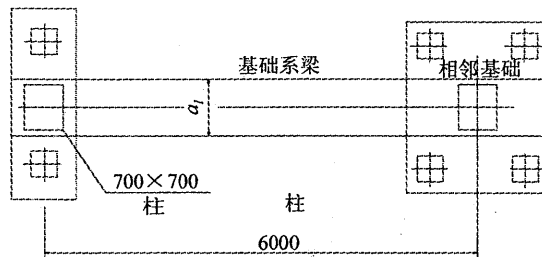


图 1 基础及系梁简图

### 4 基础系梁其他注意事项

(1) 考虑基础系梁对柱脚的弯矩约束作用时，其受力与上部结构具有关联性，因此基础系梁的构造措施应满足与上部结构一致。

(2) 基础系梁对柱脚抗弯约束作用通常为双向，为了避免柱脚处混凝土受力复杂，系梁截面应伸过柱截面，当承台宽度较小时，可与承台外边侧齐，系梁宽度每边应宽出柱脚 50mm，基础梁顶面标高应不低于基础承台顶。

### 5 结束语

本文通过对抗弯能力不足基础设计中，地基（桩基）、系梁以及柱三者抗弯刚度进行研究，指出现行“桩基”规范中有关基础系梁的设计要求不能用于对有抗弯要求的基础系梁，并导出了几种情况下基础系梁的刚度及配筋计算公式，以供相关工程设计人员参考。

注：本文发表在《武汉大学学报》2006 年

