

文章编号:1006-544X(2001)04-0366-05

# 圆截面抗滑桩非均布配筋计算方法

陈富坚, 姜宏, 韦韬, 包惠明

(桂林工学院土木工程系, 广西桂林 541004)

**摘要:** 根据滑坡治理中使用的抗滑桩的受力特点, 以钢筋混凝土截面受力分析理论和等效钢环法为基础, 推导了悬臂受力的圆截面抗滑桩非对称均布配筋的设计计算公式, 计算示例表明: 与均布配筋相比, 非对称均布配筋的圆截面抗滑桩具有明显的优越性, 且计算简便、实用。

**关键词:** 圆截面抗滑桩; 非均布配筋; 滑坡治理

**中图分类号:** U443.159

**文献标识码:** A

在滑坡治理工程中, 随着治理的滑坡的规模越来越大, 所使用的抗滑桩的截面也越来越大, 如日本大阪府的龟之瀬滑坡采用了直径 5 m, 深 50~60 m 的大型抗滑桩, 桩周身均布配筋<sup>[1]</sup>。还有深基坑支护中的护坡桩、加固工程中承受侧向压力的挡土桩等, 传统上一直采用桩周身均布配筋的方法, 然而根据它们的受力特点可知, 其所承受侧向压力是定向, 因而弯矩作用亦是定向, 这类桩如果按沿周边均匀配筋, 往往含筋率过大, 且受压区钢筋无法充分发挥作用, 无疑是很大的经济损失。若沿桩周非均匀对称地配筋, 虽然国内已有学者<sup>[2,3]</sup>推导了相应的配筋计算方法, 但这些公式过于复杂, 计算繁琐, 不便于推广应用。因此, 寻求一种简便实用的非均布配筋计算方法以用于设计圆截面抗滑桩就很有必要。本文以钢筋混凝土截面受力分析理论和等效钢环法为基础<sup>[4]</sup>, 推导出圆截面抗滑桩非均匀对称布筋的计算公式, 并以实例说明此法的优越性。

## 1 圆截面抗滑桩非对称配筋计算方法

### 1.1 基本假定

在推导圆截面抗滑桩悬臂受弯配筋公式时采用下列基本假定<sup>[4]</sup>: ①受压区混凝土最外边缘纤维的极限应变取  $\varepsilon_{\text{limax}} = 0.033$ ; ②构件截面变形符合平截面假定; ③忽略受拉区混凝土的抗拉强度; ④假定钢筋为理想弹塑性材料, 亦即当其应变值小于屈服应变时钢筋为理想弹性材料; 当其应变大于屈服应变时, 视为理想塑性材料, 应力一律按其屈服应力取用。

### 1.2 截面应力分布

抗滑桩的破坏是由于受拉钢筋首先达到屈服导致受压区混凝土压坏, 其承载力主要取决于受拉钢筋。因此, 宜增加受拉区的钢筋面积, 而受压区钢筋面积不变, 即采用非对称均布配筋。由材料力学可知, 若钢筋离中和轴越远, 其抵抗弯矩的作用就越大, 因此在设计时宜将增加的钢筋布置在离中和轴较远的塑性区, 结合抗滑桩的受力特点, 本文按 90°夹角布置, 如图 1 所示。

截面的配筋由两部组成,  $A_{g1}$  为沿桩周按构造均匀配筋时等代钢环面积,  $A_{g2}$  为 90°夹角内增加的钢弧面积。为了简化计算, 忽略桩自重对截面应力的影响, 应力分布如图 1 所示。

收稿日期: 2000-12-05; 修订日期: 2001-04-19

作者简介: 陈富坚 (1974-), 男, 广西梧州人, 硕士, 助教, 路桥专业。

### 1.3 截面强度计算基本公式

根据静力平衡条件,得如下基本方程式

$$\sum N = 0 \Rightarrow D_h + D_{g1} + D_{g2} = 0 \quad (1)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow M_l \leq M_h + M_{g1} + M_{g2} = 0 \quad (2)$$

式中:  $D_h$ ,  $M_h$ —受压区圆弧面积混凝土应力的合力和合力矩;  $D_{g1}$ ,  $M_{g1}$ —等效钢环应力的合力和合力矩;  $D_{g2}$ ,  $M_{g2}$ —增加的等效钢弧 (1/4 钢环) 应力的合力与合力矩。

根据图 1, 对  $D_h$ ,  $M_h$ ,  $D_{g1}$ ,  $M_{g1}$ ,  $D_{g2}$ ,  $M_{g2}$  分别计算如下。

#### 1.3.1 混凝土截面强度 受压区圆弧截面混凝土应力的合力 $D_h$

$$D_h = \frac{r_b}{r_c} \cdot \frac{2\theta_h - \sin 2\theta_h}{2} \cdot R_a \cdot r^2 = \frac{r_b}{r_c} \cdot R_a \cdot A r^2 \quad (3)$$

式中:  $D_h$ —受压区弓形面积合力;  $A = (2\theta_h - \sin 2\theta_h) / 2$ ;  $r$ —桩的半径;  $r_b$ ,  $r_c$ ,  $R_a$ —分别为构件工作条件系数、混凝土安全系数、混凝土抗压设计强度;  $\theta_h$ — $A$  所对应的圆心角之半; 受压区圆弧面积混凝土应力的合力矩  $M_h$  为:  $M_h = D_h \cdot Z_h$ 。式中,  $Z_h$ —弓形受压区混凝土合力作用点至重心轴  $y$  的距离, 按下式计算:

$$Z_h = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sin^3 \theta_h}{2\theta_h - \sin 2\theta_h} \cdot r$$

$$M_h = \frac{r_b}{r_c} \cdot \frac{2}{3} \sin^3 \theta_h \cdot R_a \cdot r^3 = \frac{r_b}{r_c} \cdot R_a \cdot B r^3 \quad (4)$$

式中系数  $B$  为:  $B = \frac{2}{3} \sin^3 \theta_h$ 。

#### 1.3.2 等效钢环及等效钢弧的强度 ①等效钢环、钢弧的几何性质, 设等效钢环的中面半径为 $r_g$ , 为方便计算, 等效钢弧的中面半径也为 $r_g$ , 即有

$$r_g = r - a_{g1} = r - a_{g2} = gr \quad (5)$$

式中:  $r$ —桩半径;  $a_{g1}$ ,  $a_{g2}$ —钢环、钢弧中面 (即单根钢筋截面中心) 至构件最近混凝土边缘的距离;  $g$ —钢筋所在位置 (钢环中面) 与外半径相对系数, 即  $g = r_g / r$ 。则, 等效钢环、钢弧的平均厚度分别为

$$t_{g1} = \frac{A_{g1}}{2\pi r_g} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{gi}}{2\pi r_g} = \frac{\mu r}{2g} \quad (6)$$

$$t_{g2} = \frac{2A_{g2}}{\pi r_g} = \frac{2A_{g2}}{\pi gr} \quad (7)$$

式中:  $\mu$ —截面按构造均匀布筋的含筋率。

②等效钢环、钢弧上任意点处的应力  $\delta_g$ 。设以钢环中面的应力代表沿钢环宽度的平均应力, 并根据前述基本假定, 由图 1, 得钢环上任意点  $x$  处的应变

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_{hmax}}{c} \cdot [x - (r - c)] = \epsilon_{hmax} \cdot \left(1 + \frac{x - r}{2\zeta r}\right) \quad (8)$$

钢弧上任意点  $x$  处的应变表达式与钢环一样, 只是  $x$  的变化范围不一样。实际中性轴的位置  $x$ , 由 (8) 式, 当  $\epsilon_x = 0$ , 得

$$x_0 = r(1 - 2\zeta) \quad (9)$$

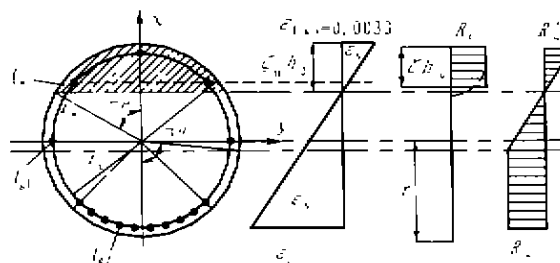


图 1 截面应力分布图

Fig.1 Stress distribution of cross section

压塑区起点(钢环开始达到受压屈服应变  $\varepsilon_{gs}$  点)的位置  $x_a$ ,

此时:  $\varepsilon_{xs} = \varepsilon_{ys} = R_g/E_g$  及  $x = x_a$ , 代入 (8) 式, 则

$$x_a = \frac{2\zeta r}{\varepsilon_{tmax}} \cdot \frac{R_g}{E_g} + r(1-2\zeta) \leq gr \quad (10)$$

$$\text{相应的圆心角之半} \quad \theta_a = \arccos\left[\frac{x_a}{r_g}\right] = \arccos\left[\frac{2\zeta}{g\varepsilon_{tmax}} \cdot \frac{R_g}{E_g} + \frac{1-2\zeta}{g}\right] \leq \pi \quad (11)$$

拉塑区起点(即钢环开始达到屈服拉应变点  $\varepsilon_{yl}$ )的位置  $x_l$ ,

此时:  $\varepsilon_{xl} = \varepsilon_{yl} = -R_g/E_g$ , 及  $x = x_l$ , 代入 (10) 式, 则

$$x_l = \frac{2\zeta r}{\varepsilon_{tmax}} \cdot \frac{R_g}{E_g} + r(1-2\zeta) \geq -gr \quad (12)$$

$$\text{相应的圆心角之半} \quad \theta_l = \arccos\left[-\frac{2\zeta}{g\varepsilon_{tmax}} \cdot \frac{R_g}{E_g} + \frac{1-2\zeta}{g}\right] \leq \pi \quad (13)$$

则等效钢环上任意点  $x$  处的应力  $\delta_g$ :

当  $r > x \geq x_a$  (即  $0 < \theta \leq \theta_a$ ) 时, 取  $\delta_g = R_g$ ,

当  $x_a > x \geq x_l$  (即  $\theta_a < \theta < \theta_l$ ) 时,  $\delta_g = \frac{x - x_0}{x_a - x_0} \cdot R_g = \frac{g\cos\theta - (1-2\zeta)}{g\cos\theta_a - (1-2\zeta)} \cdot R_g$ ,

当  $x_l \geq x > -r$  (即  $\theta_l \leq \theta \leq \pi$ ) 时, 取  $\delta_g = -R_g$ .

等效钢弧上任意点  $x$  处的应力: 根据前面的假定, 增加的圆弧全部进入塑性区, 则

$$\delta_g = -R_g \quad (15)$$

③等效钢环、钢弧的合力  $D_{g1}$ ,  $D_{g2}$ .

$$D_{g1} = 2 \int_0^\pi \frac{r_b}{r_s} \delta_g dA_s,$$

式中:  $dA_s$ —等效钢环微面积;  $r_s$ —钢筋安全系数.

$$dA_s = t_{g1} \cdot r_g \cdot d\theta = t_{g1} \cdot gr \cdot d\theta.$$

$$\begin{aligned} D_{g1} &= 2 \int_0^\pi \frac{r_b}{r_s} \delta_g dA_s = 2 \int_0^\pi \frac{r_b}{r_s} \delta_g \cdot t_{g1} \cdot r_g \cdot d\theta \\ &= 2 \int_0^{\theta_a} \frac{r_b}{r_s} R_g t_{g1} gr d\theta + 2 \int_{\theta_a}^{\theta_l} \frac{g\cos\theta - (1-2\zeta)}{g\cos\theta_a - (1-2\zeta)} \cdot \frac{r_b}{r_s} R_g \cdot t_{g1} \cdot gr d\theta + 2 \int_{\theta_l}^\pi \left(-\frac{r_b}{r_s} R_g\right) \cdot t_{g1} \cdot gr d\theta \\ &= \frac{2r_b}{r_s} R_g t_{g1} gr \left\{ \theta_a - \pi + \theta_l + \frac{1}{g\cos\theta_a - (1-2\zeta)} \cdot [g(\sin\theta_l - \sin\theta_a) - (1-2\zeta)(\theta_l - \theta_a)] \right\} \end{aligned}$$

令  $C$  代替大括号内式子, 则

$$D_{g1} = \frac{2r_b}{r_s} R_g t_{g1} gr C \quad (16)$$

$$D_{g2} = 2 \int_{\frac{3}{4}\pi}^\pi \frac{r_b}{r_g} R_g dA_s = 2 \int_{\frac{3}{4}\pi}^\pi \frac{r_b}{r_s} R_g \cdot t_{g2} \cdot gr d\theta = \frac{\pi r_b}{2r_s} R_g t_{g2} gr \quad (17)$$

④等效钢环、钢弧应力合力矩  $M_{g1}$ ,  $M_{g2}$ .

$$M_{g1} = 2 \int_0^\pi x dD_{g1}, \quad M_{g2} = 2 \int_{\frac{3}{4}\pi}^\pi x dD_{g2}$$

式中:  $x = gr \cos\theta$ ;  $dD_{g1} = \frac{r_b}{r_s} \delta_g dA_{s1} = \frac{r_b}{r_s} \delta_g \cdot t_{g1} \cdot gr \cdot d\theta$ ;

$$dD_{g2} = \frac{r_b}{r_s} R_g dA_{s2} = \frac{r_b}{r_s} R_g \cdot t_{g2} \cdot gr \cdot d\theta.$$

$$M_g = M_{g1} + M_{g2} = \frac{2r_b}{r_s} R_g \cdot t_{g1} \cdot g^2 r^2 \left\{ \sin\theta_a + \sin\theta_l + \frac{1}{g\cos\theta_a - (1-2\zeta)} \right\}.$$

$$\left[ g \left( \frac{\theta_1 - \theta_a}{2} + \frac{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_a}{4} \right) - (1 - 2\zeta)(\sin \theta_1 - \sin \theta_a) \right] \left\} + \sqrt{2} \frac{r_b}{r_s} t_{g2} \cdot g^2 r^2 R_g \right.$$

以  $D$  代替大括号内式子, 则

$$M_g = \frac{2r_b}{r_s} R_g t_{g1} g^2 r^2 \cdot D + \sqrt{2} \frac{r_b}{r_s} t_{g2} g^2 r^2 R_g = \frac{r_b}{r_s} R_g g^2 r^2 (2Dt_{g1} + \sqrt{2}t_{g2}) \quad (18)$$

#### 1.4 圆截面抗滑桩强度计算公式

将式 (3), (4), (16), (17), (18) 代入式 (1), (2), 得桩的强度计算公式

$$R_a \cdot Ar^2 + R_g t_{g1} \cdot grC - \frac{\pi}{2} R_g t_{g2} gr = 0 \quad (19)$$

$$M_j \leq \frac{r_b}{r_s} R_a Br^3 + \frac{r_b}{r_s} R_g g^2 r^2 (2Dt_{g1} + \sqrt{2}t_{g2}) \quad (20)$$

式中:  $A, B, C, D$  为抗滑桩的强度计算系数, 与圆截面偏心受压构件相同, 均与  $\zeta, R_g$  有关, 系数  $C$  和  $D$  还与  $g$  有关, 其值可直接查文献 [5]。

#### 1.5 配筋设计

1.5.1  $t_{g1}$  的计算 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94), 对抗滑桩, 建议取受压区最小含筋率为 0.2% (预制桩为 0.8%)。因此, 可取  $\mu = 0.2\%$ , 或根据工程实际选取适当的构造配筋率  $\mu$ , 按式 (6) 计算得。

1.5.2  $t_{g2}$  的计算 由式 (19) 得

$$t_{g2} = \frac{R_a \cdot Ar^2 + R_g t_{g1} grC}{\pi R_g gr/2} \quad (21)$$

假定  $\zeta$  值为  $\zeta_1$ , 验算  $\theta_1$ , 查文献 [5] 附录三得系数  $A, B, C, D$ , 相应代入式 (21) 求得  $t_{g2}$ ; 再相应代入式 (20) 算得  $M_{j1}$ , 若  $M_{j1}$  与设计值相符, 则认为  $\zeta_1$  即是设计可以采用的  $\zeta$  值, 并可将  $\zeta = \zeta_1$  所求得的系数  $A, B, C, D$  代入式 (21), 求得  $t_{g2}$ ; 若  $M_{j1}$  与  $M_j$  不相符, 则需重新假定  $\zeta$  值, 重复上述步骤, 直至假定  $\zeta = \zeta_1$  所求得  $M_{ji}$  与  $M_j$  相符为止, 实际计算发现, 往往重复三次以内即可得到所需的  $\zeta$  值。

## 2 计算实例

为说明本文公式的应用情况, 现取文献 [3] 中的算例作比较计算。

已知用于抗滑坡的钻孔灌注桩: 直径为 1 000 mm, 混凝土强度等级 C25, 弯矩设计值为 1 400 kN·m, 钢筋采用 II 级钢, 试计算受拉钢筋。

解:  $t_{g1}$  的计算  $t_{g1} = \frac{\mu r}{2g} = \frac{0.2\% \times 500}{2 \times 0.87} = 0.574 \text{ 713 mm}$ 。

$t_{g2}$  的计算 由表 1 取  $\zeta = 0.33$ , 纵向钢筋采用 7Φ36,  $A_g = 7 \text{ 125 mm}^2$ 。文献 [3] 的计算结果为:  $A_s = 7 \text{ 088 mm}^2$ , 取 7Φ36,  $A_g = 7 \text{ 125 mm}^2$ 。本文计算结果与文献 [3] 计算有微小偏差, 原因是本法  $g$  值采用插值法引起的。若采用均布配筋的方法, 按文献 [4] 的算法, 则需钢筋 15 924 mm<sup>2</sup>, 而按本文算法所需钢筋为 8 535 mm<sup>2</sup> (将构造筋计入), 故可节省钢筋 47%。

由上述计算可见, 本文的配筋计算方法思路明确, 步骤简单, 手工计算相当方便。

## 3 结 论

①根据抗滑桩的受力特点, 提出了圆截面抗滑桩采用非均布配筋的设计方法, 计算实例表明, 该方法可大大节省钢筋用量, 具有较好的经济效益。

②根据钢筋砼正截面受力分析理论, 以等效钢环法为基础, 推导出圆截面抗滑桩的非对称均布配筋计算公式, 计算时可直接查阅文献 [5] 中有关图表, 计算方便, 思路清晰。

表 1 设计钢筋计算表

Table 1 Calculation of steel cross-section area

$\xi$	钢弧端点圆 心角 $\theta/(^\circ)$	A	B	C	D	$t_d/\text{mm}$	计算弯矩 /kN·m	设计弯矩 /kN·m	$A_g/\text{mm}^2$
0.34	135	0.691 5	0.469 9	-0.781 3	1.788 6	10.446 1	1 551	1 400	7 574
0.32	135	0.635 1	0.443 8	-0.883 0	1.753 2	9.156 8	1 384	1 400	6 692
0.33	135	0.663 1	0.456 8	-0.832 0	1.771 6	9.553 2	1 431	1 400	6 964

注:系数 A, B, C, D 是根据  $R_s = 340 \text{ MPa}$ , 查文献[5]附录三表 7-1b 所得。

③本计算方法不仅手工计算方便, 将其编成程序实现电算更为迅速。

### 参考文献:

- [1] 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向 [A]. 《滑坡文集》编委会 滑坡文集 (第十三集) [C]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. 60~64.
- [2] 赵明华. 圆形和环形截面挡土桩的配筋计算 [J]. 湖南大学学报, 1998, (2): 78~82.
- [3] 李均民. 圆截面挡土桩配筋的简化计算 [A]. 刘金砺. 桩基工程设计与施工技术 [C]. 北京: 中国建材工业出版社, 1994, 103~110.
- [4] 邵容光. 结构设计原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987. 135~140.
- [5] 交通部公路规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTJ 023-85) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1985.

## Computation of non-uniformly distributive reinforcement of retaining piles with round section

CHEN Fu-jian, JIANG Hong, WEI Tao, BAO Hui-ming

(Department of Civil Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Based on the loading characteristics of retaining piles in landslide treatment and the theory of stress analysis of reinforced concrete cross section, this paper deduced the formulas for the computation of non-uniformly distributive reinforced retaining piles with round section. Example shows that this method has obvious advantage in the simplicity and precision of calculation.

**Key words:** retaining piles with round section; non-uniformly distributive reinforcement; landslide treatment