

文章编号:1002-0268 (2006) 09-0032-04

圆形和环形截面抗滑桩的非均布配筋计算方法

陈富坚, 刘均利, 景天虎

(桂林工学院 土木工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 对大截面抗滑桩考虑非均布配筋可以大大降低配筋量。从受力特点、计算简便性以及布筋要求等方面对抗滑桩和其他定向受力桩作了定性对比分析。以《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002) 中圆形与环形截面受弯构件配筋计算公式为基础, 推导了圆形与环形截面抗滑桩 120° 夹角非均布配筋计算公式, 进行了算例对比分析和经济配筋定量计算探讨。结果表明: 计算方法是经济合理的; 抗滑桩的总配筋量与构造配筋率近似成正比, 构造配筋率取 0.2% (预制桩为 0.8%) 时配筋最为经济。

关键词: 抗滑桩; 非均布配筋; 圆形截面; 环形截面

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Method for Computation of Non-uniform Distribution of Reinforcement of Slide-resistant Piles with Round or Annular Section

CHEN Fu-jian, LIU Jun-li, JING Tian-hu

(Department of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: Non-uniform distribution of reinforcement for slide-resistant pile can greatly reduce the amount of the reinforcement. Qualitative comparison between slide-resistant pile and other laterally loaded piles are made in terms of loading characteristics, simplicity for calculation and requirement for reinforcement distribution, and improvement is made to the computation method for the non-uniform distribution of reinforcement of slide-resistant piles with round or annular section. Based on the calculating formulas for uniform distribution of reinforcement of flexural member with round or annular section, a set of calculation formulas for the non-uniform distribution are deduced. Comparative calculation is made with other relative methods and quantitative calculation is also made to explore the cost effective reinforcement. The results show that the method is economically efficient; and that the general reinforcement for the pile is approximately proportional to the structurally required reinforcement and the most cost effective reinforcement for the pile is to take the structural reinforcement rate as 0.2% (0.8% for precast pile).

Key words: slide-resistant pile; non-uniform distribution of reinforcement; round section; annular section

0 概述

目前工程界对圆形和环形截面抗滑桩的配筋往往参照建筑桩基均布配筋的做法。事实上, 与各向受力的建筑桩基相比, 抗滑桩侧向受力的特征明确, 均布配筋显然浪费。近年来国内已有学者意识到这

个问题, 并开始研究工作^[1]。文献[1]研究了圆形和环形截面钢筋砼偏心受压桩按 90° 夹角非对称均布配筋的计算方法; 文献[2]研究了圆形实心截面受弯构件半圆配筋的计算方法; 作者 2001 年也探讨了圆截面抗滑桩非均布配筋计算方法^[3]。由于抗滑桩在实际使用中桩截面形式的多样性及其本身的受力特点, 有

收稿日期: 2005-4-29

作者简介: 陈富坚 (1974-), 男, 广西梧州人, 硕士, 讲师, 研究方向为路基路面工程. (amstrongcfj@yahoo.com.cn)

必要进一步研究圆形与环形截面抗滑桩的非均布配筋计算方法。本文从受力特点、计算简便性以及布筋要求等方面综合考虑后,提出了圆形与环形截面抗滑桩 120° 夹角的非均布配筋计算方法。

事实上,确定抗滑桩受拉钢筋的布置夹角应考虑结构的安全性、计算的便利性以及钢筋间距的合理性。从安全角度而言,抗滑桩与一般基坑用的护坡桩不同。护坡桩承受的是定向静止土压力,90° 夹角配筋是安全合理的。而抗滑桩承受的是动土推力,且滑坡推力具有一定的横向不均匀性,90° 夹角配筋可能偏不安全;对于单桩或无横向联系的排桩,180° 配筋较为妥当;但考虑到实际使用的抗滑桩均设置了横向或横、纵向水平加劲梁,因此,120° 夹角配筋应能符合安全要求。从计算便利角度考虑,在满足安全要求的前提下,增加的受拉钢筋全部布置在塑性区时计算是最简便的,因此布筋夹角不可太大,以免超出塑性区,导致必须按弹性区、塑性区分区计算。文献[2]按 180° 夹角配筋,受拉钢筋处于弹性区和塑性区,计算较为麻烦。文献[1]采用 90° 夹角配筋,其原因可能是考虑到偏心力引起的弯矩一般不大,钢环的计算塑性角也不大,若布筋夹角过大,会使抗拉钢环处于弹、塑性两个区域。抗滑桩承受的弯矩则往往较大,引起的塑性角也较大,布筋范围应适当放宽。再者,从钢筋合理间距角度考虑,由于抗滑桩配筋量较大,90° 夹角布筋往往难于满足规范^[4,5]对钢筋间距的要求,120° 夹角配筋则相对容易满足。综合上述考虑,作者认为:对于抗滑桩,120° 夹角布筋应是安全、合理的。

1 圆形和环形截面抗滑桩的非均布配筋计算方法

《公路路基设计规范》^[5]规定:抗滑桩桩身按受弯构件设计。本文以《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002)^[6]中圆形与环形截面受弯构件均布配筋公式为基础,推导了悬臂受力的圆形与环形截面抗滑桩的非均布配筋计算公式,并进行了算例对比分析和经济配筋定量计算探讨。

1.1 基本公式的推导

1.1.1 圆形截面

设 A_c 为混凝土受压区面积(弓形阴影部分); A 为构件截面积; $\alpha = A_c/A$ 为混凝土相对受压区面积; r 为截面的半径; r_s 为纵向钢筋所在圆周的半径; A_{s0} 为沿周边均匀配置的钢筋面积,可按构造配筋; A_{s1} 为 120° 夹角内增加的抗拉钢筋面积; ϵ_s 为受拉区钢筋拉应变; ϵ_y 为钢筋屈服拉应变; α 为钢环受压区

进入塑性阶段的相对面积; α_t 为钢环受拉区进入塑性阶段的相对面积; f_y 为普通钢筋抗拉强度设计值; M_j 为计算弯矩; ζ 为相对受压区高度; ζ_l 为相对界限受压区高度; h_0 为有效高度; ϵ_u 为极限压应变; ϵ_s 为受压区钢筋压应变。如图 1 所示。根据静力平衡条件及文献 [6],推导得圆形截面抗滑桩正截面强度计算的基本公式为

$$0 = f_{cm} \alpha (1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha}) A + f_y A_{s0} (\alpha - \alpha_t) - f_y A_{s1}, \quad (1)$$

$$M_j = \frac{2}{3} f_{cm} A r \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_y A_{s0} r_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} + 1.102 658 f_y r_s A_{s1}, \quad (2)$$

式中, $\alpha = 1.25 - 2\alpha_t$ 且当 $\alpha < 0$ 时,取 $\alpha = 0$; f_{cm} 为混凝土弯曲抗压强度设计值; f_y 为普通钢筋抗拉强度设计值。

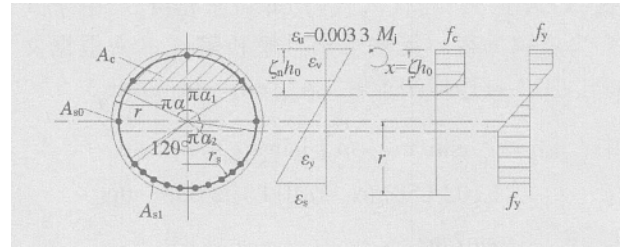


图 1 圆截面 120° 夹角配筋应力图

Fig.1 Stress distribution of Round Section

1.1.2 环形截面

对于环形截面抗滑桩,由于需考虑抗剪要求,因此桩的壁厚不能过薄。此时需根据截面受压区高度分两种情况考虑。

(1) 当 $d_h \leq r_w - r_n$ 时,空心抗滑桩的受压区按圆形截面计算,则基本计算公式为

$$0 = f_{cm} \alpha (1 - (\sin 2\pi\alpha)/2\pi\alpha) A + f_y A_{s0} (\alpha - \alpha_t) - f_y A_{s1}, \quad (3)$$

$$M_j = \frac{2}{3} f_{cm} A r_w \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_y A_{s0} r_s \frac{\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t}{\pi} + 1.102 658 f_y r_s A_{s1}. \quad (4)$$

此时, $A = \pi r_w^2$; $\alpha = A_c/A$; $\alpha_t = 1.25 - 2\alpha$ 且当 $\alpha < 0$ 时,取 $\alpha = 0$ 。

(2) 当 $d_h > r_w - r_n$ 时,抗滑桩的受压区按环形截面计算,则基本计算公式为

$$0 = f_{cm} \alpha A + f_y A_{s0} (\alpha - \alpha_t) - f_y A_{s1}, \quad (5)$$

$$M_j = f_{cm} (r_w + r_n) A (\sin \pi\alpha) / (2\pi) + f_y A_{s0} r_s (\sin \pi\alpha + \sin \pi\alpha_t) / \pi + 1.102 658 f_y r_s A_{s1}, \quad (6)$$

式中, $A = \pi (r_w^2 - r_n^2)$; $\alpha = 1 - 1.5\alpha_t$ 当 $\alpha < 0$ 时,取 $\alpha = 0$;

r_n 、 r_w 分别为空心桩的内径和外径。

1.2 方程求解

上述基本公式可采用如下解法。

1.2.1 圆形截面抗滑桩

联解式 1)、式 2) 组成的方程组即可得到 A_{sl} , 具体如下:

将式 1) 代入式 (2), 得

$$\frac{2}{3}r_n^3 \sin^3 \pi \alpha + f \rho r_s [\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha + 1.102 658 \pi (\alpha \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi (\alpha \frac{\sin 2 \pi \alpha}{2 \pi}) - n \pi = 0, \quad (7)$$

$$\text{令 } f(\alpha) = \frac{2}{3}r_n^3 \sin^3 \pi \alpha + f \rho r_s [\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha + 1.102 658 \pi (\alpha \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi (\alpha \frac{\sin 2 \pi \alpha}{2 \pi}) - n \pi = 0. \quad (8)$$

从式 7) 求出 α 再代入式 1) 即可求得 A_{sl} 。由于式 (8) 为超越方程, 无法求出其解析解, 本文根据文献[7], 用牛顿迭代法求解: $\alpha_{n+1} = \alpha_n - f(\alpha_n)/f'(\alpha_n)$,

$$\text{式中, } f(\alpha_n) = \frac{2}{3}r_n^3 \sin^3 \pi \alpha_n + f \rho r_s [\sin \pi \alpha_n + \sin \pi \alpha_n + 1.102 658 \pi (\alpha_n - \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi (\alpha_n - \frac{\sin 2 \pi \alpha_n}{2 \pi}) - n \pi$$

$$f'(\alpha_n) = 2 \pi \sin^2 \pi \alpha_n \cos \pi \alpha_n + f \rho r_s [\cos \pi \alpha_n - 2 \cos \pi \alpha_n + 3.307 973] + 1.102 658 r_s \pi (1 - \cos 2 \pi \alpha_n),$$

在 $f(\alpha_n)$, $f'(\alpha_n)$ 中, $\rho = A_{s0}/A$, $n = M_j/(A f_{cm})$, $f = f_y/f_{cm}$ 。

增加的受拉钢筋含筋率 ρ , 受拉区所需要增加的钢筋面积 A_{sl} 及钢筋总面积 A_s 为

$$\rho = \frac{1}{f} (\alpha \frac{\sin 2 \pi \alpha}{2 \pi}) + \rho (\alpha \alpha),$$

$$A_{sl} = \rho A, A_0 = \rho A, A_s = (\rho + \rho) A. \quad (9)$$

1.2.2 环形截面抗滑桩

(1) 当 $\alpha_0 \leq r_w - r_n$ 时, 将式 3) 代入式 4), 得

$$\frac{2}{3}r_w \sin^3 \pi \alpha + f \rho r_s [\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha + 1.102 658 \pi (\alpha \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi (\alpha \frac{\sin 2 \pi \alpha}{2 \pi}) - n \pi = 0.$$

同理可用牛顿迭代法求解, 此时

$$f(\alpha_n) = \frac{2}{3}r_w \sin^3 \pi \alpha_n + f \rho r_s [\sin \pi \alpha_n + \sin \pi \alpha_n + 1.102 658 \pi (\alpha_n - \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi (\alpha_n - (\sin 2 \pi \alpha_n)/2 \pi) - n \pi$$

$$f'(\alpha_n) = 2 \pi \sin^2 \pi \alpha_n \cos \pi \alpha_n +$$

$$f \rho r_s \pi [\cos \pi \alpha_n - 2 \cos \pi \alpha_n + 3.307 973] +$$

$$1.102 658 r_s \pi (1 - \cos 2 \pi \alpha_n),$$

$$\rho = A_s / (\pi r_w^2), \rho = 0.2\% (r_w^2 - r_n^2) / r_w^2, \alpha = A_c / (\pi r_w^2).$$

计算得出 α 后, 代入式 10) 即可求得 A_s

$$\rho = \frac{1}{f} (\alpha \frac{\sin 2 \pi \alpha}{2 \pi}) + \rho (\alpha \alpha), A_s = (\rho + \rho) A. \quad (10)$$

(3) 当 $\alpha_0 > r_w - r_n$ 时, 由式 5)、式 6) 可得

$$\frac{r_w + r_n}{2} \sin \pi \alpha + f \rho r_s [\sin \pi \alpha + \sin \pi \alpha + 1.102 658 \pi (\alpha \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi \alpha - n \pi = 0.$$

同理, 用牛顿迭代法求解, 此时,

$$f(\alpha_n) = \frac{r_w + r_n}{2} \sin \pi \alpha_n + f \rho r_s [\sin \pi \alpha_n + \sin \pi \alpha_n + 1.102 658 \pi (\alpha_n - \alpha)] + 1.102 658 r_s \pi \alpha_n - n \pi$$

$$f'(\alpha_n) = \frac{r_w + r_n}{2} \pi \cos \pi \alpha_n + f \rho r_s \pi (\cos \pi \alpha_n - 1.5 \cos \pi \alpha_n + 2.756 644) + 1.102 658 r_s \pi,$$

$$\rho = \frac{1}{f} \alpha + \rho (\alpha \alpha),$$

$$A_s = (\rho + \rho) A = (\rho + \rho) \pi (r_w^2 - r_n^2). \quad (11)$$

2 计算示例

上述计算公式及步骤虽然很明确, 但手工计算较为麻烦。本文利用 C 语言编制了计算程序 SRP, 并用其对文献[2]中的算例作了比较计算, 计算时根据《建筑桩基技术规范》JGJ94-94^[4]的建议, 构造配筋率取 0.2%。

例 1^[2] 一圆形截面受弯构件, 已知 $r=200$ mm, $r_s=165$ mm, $f_{cm}=11$ N/mm², $f_y=310$ N/mm², $M=100$ kN·m, 求 A_s 。

本文的计算结果为: $A_s=1 165$ mm²; 文献[2]按 180° 夹角配筋的计算结果为: $A_s=1 645$ mm², 而按截面均布配筋法的计算结果^[8]为: $A_s=2 326$ mm²。本文算法 (120° 夹角配筋) 比文献 [2] 180° 夹角配筋) 节省约 20%, 比截面均布配筋法节省约 50%。由此对比计算可知, 120° 夹角非均布配筋的经济效果是很显著的。

3 经济配筋探讨

文献[1]从理论上定性分析认为, 当 α 大于 0.625 (圆形截面) 或 2/3 (环形截面) 时, 说明抗拉钢筋配置过高, 出现了小偏心受压状态。此时应增加构造配筋率 ρ , 直至 α 小于 0.625 (圆形截面) 或 2/3 (环形截面), 以确保配筋率是经济的。由于抗滑桩按悬臂受

弯桩计算,并无大小偏心之分,因此,有必要探讨其经济配筋率是否存在。

由式(8)~式(10)可知, A_s 由 ρ 、 ρ 共同决定,而由基本计算公式(1)~(6)可看出, ρ 由 ρ 和 M_j 共同决定(α 为由 ρ 和 M_j 共同决定的中间变量),因此,当 M_j 一定时, A_s 由 ρ 唯一确定。为了寻找 A_s 与 ρ 的关系,以实现经济配筋,下面以文献[8]中的实例做定量计算分析。

例2^[8] 广西某公路滑坡采用抗滑桩加固,经计算,桩身 $M=8\,668\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。下面采用圆截面和环形截面两种桩形分别计算其总配筋量 A_s ,以寻找 A_s 与 ρ 的关系。①采用2 m直径的圆截面抗滑桩加固,取 $\rho=0.2\%\sim 0.65\%$,计算步长为0.05%,分别计算其相应的 α , A_s , ρ 与 A_s 的对应关系见图2;②同理计算外径为4 m,内径为3 m的环形截面抗滑桩,见图3。

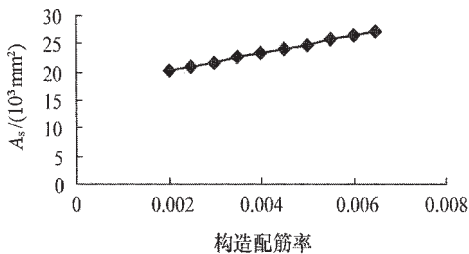


图2 圆截面桩总配筋量与构造配筋率的关系

Fig.2 Relationship of general reinforcement and structural reinforcement ratio for round section

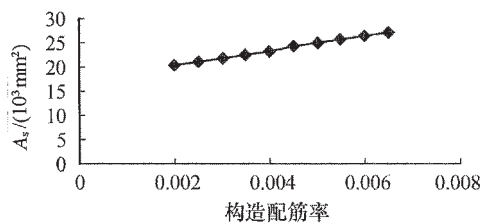


图3 环形截面桩总配筋量与构造配筋率的关系

Fig.3 Relationship of general reinforcement and structural reinforcement ratio for annular section

从图2和图3可以看出,总配筋量 A_s 随 ρ 的增大而增大,两者基本成正比关系,最低点为 $\rho=0.2\%$ 时的对应点。因此,抗滑桩的最经济配筋状态是 ρ 最小时,即 $\rho=0.2\%$,此时计算所得的 α 值均小于0.3。故,文献[1]以等于0.625(圆形截面)或2/3(环形截面)作为经济配筋的判定指标,并以其作为迭代

计算的初值,并不适用于按纯弯构件模式计算的抗滑桩。对于抗滑桩,本文经定量试算,发现当取 $\rho=0.2\%$ 时, α 在0.1~0.3之间取初值时, α 可以快速地收敛于真值;当 α 的计算初值过小(如0.01)或过大(如1.0),计算时 α 容易收敛错误或无法收敛,导致计算失败。

4 结论

(1) 从受力特点、计算简便性以及布筋要求等方面对抗滑桩和其他定向受力桩作了定性对比分析,认为抗滑桩以120°夹角配置受拉钢筋是安全、合理的。

(2) 以受弯构件均布配筋基本公式为基础,推导了圆形截面和环形截面抗滑桩120°夹角非均布配筋的基本计算公式。对于环形截面抗滑桩,根据其受滑坡推力大而采用厚壁空心桩的特点,按受压区面积高度将环形截面桩分为圆形截面算法和环形截面算法两种,完善了文献[1]的环形截面配筋计算方法,使抗滑桩的非均布配筋计算方法更全面、合理。算例对比表明本文的计算方法是经济合理的。

(3) 经济配筋定量计算发现,在计算弯矩一定时,抗滑桩的截面总配筋量 A_s 由 ρ 唯一确定, A_s 与 ρ 近似成正比, ρ 取0.2%(预制桩为0.8%)时配筋最为经济。当取 $\rho=0.2\%$ 时, α 在0.1~0.3之间取初值时 α 可以快速地收敛于真值;若 α 的计算初值过小(如0.01)或过大(如1.0),计算时 α 容易收敛错误或无法收敛。因此,建议采用该法计算时, α 在0.1~0.3之间取初值。

参考文献:

- [1] 赵明华,易伟建.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.
- [2] 邓志恒,张喜德.钢筋混凝土圆形截面半圆配筋正截面承载力计算[J].广西大学学报,1998,(5):14~17.
- [3] 陈富坚,姜宏,韦韬,等.圆截面抗滑桩非均布配筋计算方法[J].桂林工学院学报,2001,(4):366-370.
- [4] JGJ94-94,《建筑桩基技术规范》[S].
- [5] JTG D30-2004,《公路路基设计规范》[S].
- [6] GB 50010-2002,《混凝土结构设计规范》[S].
- [7] 杨大地,涂光裕.数值分析[M].重庆:重庆大学出版社,1998.
- [8] 陈富坚.大截面抗滑桩设计方法研究[D].南昌:南昌大学,2001.