

边坡加固工程中抗滑桩间距的确定

胡晓军^{1,2}, 王建国¹

(1. 合肥工业大学土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽水利水电职业技术学院, 安徽 合肥 230601)

摘要 考虑抗滑桩桩间土拱效应, 以桩侧与边坡土体间的摩阻力及黏着力承担滑坡推力的静力平衡条件和土拱跨中与拱脚处截面的强度条件共同控制, 建立了抗滑桩间距的计算公式. 该公式适当考虑了滑坡推力分布的影响. 工程实例表明, 该抗滑桩间距计算公式的计算结果较为合理, 具有一定的工程应用价值.

关键词 边坡加固 抗滑桩 土拱效应 黏着力 强度条件 桩间距

中图分类号 :TU457 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)03-0330-04

抗滑桩作为支挡结构, 具有施工快、安全可靠、节省坞工等特点, 在水利水电、铁路公路交通、机场、矿山、运河等建设的边坡加固工程中广泛应用. 桩间距是抗滑桩设计的重要指标之一, 桩间距过大可能造成土体从桩间挤出, 桩体抗滑作用失效, 桩间距过小又会使工程投资增大, 造成资金浪费、施工困难. 因此寻求既能保证边坡加固工程安全可靠, 又可节约工程投资的合理桩间距, 成为岩土工程师所关注的重要课题. 抗滑桩的桩间距与滑体的土质条件、物理力学性质、抗滑桩桩径、滑坡推力大小、分布、桩体与土体之间的摩阻力、黏着力等因素密切相关. 关于合理桩间距的计算, 目前研究主要存在以下问题: 文献[1]和文献[2]根据抗滑桩两侧摩阻力之和小于桩间滑坡推力, 建立了桩间距的计算公式, 但未考虑土拱的强度条件. 文献[3]假定桩间土拱为三铰拱, 考虑桩侧摩阻力, 根据莫尔库仑强度条件, 推得了抗滑桩间距的计算公式, 但其以抗滑桩的正面摩阻力来承担桩间滑坡推力与实际不符. 在拱脚强度验算及桩侧摩阻力计算中, 未考虑相邻土拱在支座处的叠加效应, 对于桩侧与土体之间的摩擦系数的取值也不尽合理, 致使计算的桩间距过大, 与工程实际不符. 文献[4]假定桩间土拱为二铰拱, 以桩间摩阻力不小于作用于桩间土拱的压力及莫尔库仑强度准则, 得到桩间距, 但其土拱强度校核时, 土拱危险点的选取不够全面, 拱脚的具体位置是桩的正面还是桩侧比较模糊, 模型拱跨取为桩间净距值得推敲, 以桩侧摩阻力承担滑坡推力的力学概念不够明确, 同时, 桩侧摩阻力计算采用土体的强度指标 c, φ 值, 使桩侧摩阻力的计算结果偏大, 偏不安全. 考虑滑坡推力分布对桩间距影响方面的研究未见报道. 鉴于以往研究中存在的问题, 本文在考虑相关影响因素的基础上, 研究抗滑桩间距的计算方法, 使其更加符合工程实际.

1 计算模型

抗滑桩之间土体在滑坡推力作用下, 有向前挤出的趋势, 由于土体自身抗剪强度的存在, 自然形成以相邻两桩为拱脚的土拱, 但其前提条件应该是土体不会沿桩侧挤出, 即拱脚处桩侧的摩阻力与黏着力之和应大于或等于作用于土拱上的滑坡推力.

1.1 土拱形式

工程中常见的抗滑桩的截面形状有方形和圆形, 对于方桩, 土拱区宽度取桩的侧面边长, 圆桩的土拱区宽度可取圆的内接四边形边长(图 1), 二者的土拱区厚度均取单位 1.

土拱跨度取桩间净距 s , 拱高为 f , 桩侧为土拱支座. 土拱能适应位移而不发生破坏, 结构可简化为静定三铰拱, 如图 2 所示.

1.2 基本假定

基本假定:(a) 不计土拱自重, 假定土拱效应自桩顶以下均匀一致, 将土拱简化为沿桩长方向的平面应变问题;(b) 相邻两桩间土拱形状为对称于跨中的抛物线, 即拱轴线为抛物线;(c) 土质为横观各向同性, 即单位

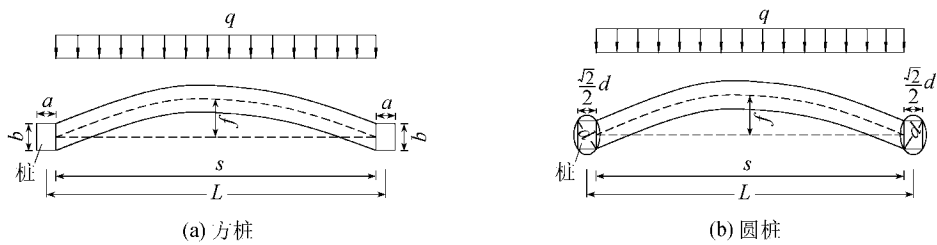


图 1 桩间土拱示意图

Fig.1 Sketch of soil arch between adjacent piles

厚度的水平土层内,土质宏观上是均匀的 ;(d) 滑坡推力水平均匀分布作用于土拱上 ;(e) 不考虑土拱本身的剩余抗滑力,土拱上的滑坡推力全部由桩侧摩擦阻力和黏着力承担 .

1.3 土拱受力分析

由结构力学可知,均布荷载作用下,三铰拱的合理拱轴线方程为

$$y = \frac{4f}{s^2}(s - x)x \tag{1}$$

由力及力矩平衡方程可得拱脚反力及拱顶轴力分别为

$$F_x = \frac{qs^2}{8f} \tag{2}$$

$$F_y = qs/2 \tag{3}$$

$$N = \frac{qs^2}{8f} \tag{4}$$

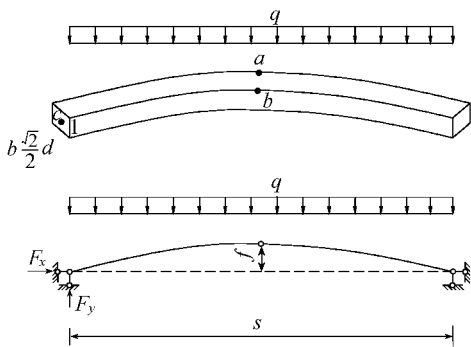


图 2 土拱内力计算简图

Fig.2 Calculation sketch of soil arch internal force

为保证相邻桩间土拱的稳定性,需要满足桩间静力平衡条件,即两桩侧面的摩擦阻力、黏着力之和不小于桩间作用于土拱上的滑坡推力.为方便分析,式中取等号.

1.3.1 圆桩

$$2\left(F_x \tan \delta + c_w \frac{\sqrt{2}}{2} d\right) = qs \tag{5}$$

将式(2)代入式(5),化简得

$$f = \frac{qs^2 \tan \delta}{4(qs - \sqrt{2} c_w d)} \tag{6}$$

式中 : δ ——抗滑桩桩侧与滑坡土体之间的摩擦角,若桩侧为岩块及粗粒土取 $\delta = \varphi/2$,若桩侧为细粒土取 $\delta = 2\varphi/3$ 或 $\varphi/2$ ^[5] ; c_w ——抗滑桩桩侧表面与滑坡土体之间的单位黏着力,kPa,可取 $c_w = c \tan \delta / \tan \varphi$ ^[6] ; d ——抗滑桩桩径,m ; q ——作用于土拱上的滑坡推力,kN/m. 当滑体是一种黏聚力较大的地层(如黏土、土夹石、岩石)时,其推力分布图式可近似按矩形考虑^[7], q 取矩形分布强度 如果滑体是一种以摩擦角为主要抗剪特性的堆积体,其推力分布图式可近似按三角形考虑,介于两者之间的可按梯形分布^[7] 考虑, q 取三角形或梯形分布强度最大值.

1.3.2 方桩

$$2(F_x \tan \delta + c_w b) = qs \tag{7}$$

将式(2)代入式(7),化简得

$$f = \frac{qs^2 \tan \delta}{4(qs - 2c_w b)} \tag{8}$$

式中 b 为抗滑桩侧面宽度.

1.4 土拱截面强度验算及桩间距确定

为保证桩间土拱不因剪切破坏而丧失稳定性,以莫尔-库仑破坏准则作为验算标准,取拱顶、拱脚处截面为危险截面进行强度验算.莫尔-库仑破坏准则表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \tag{9}$$

1.4.1 圆桩

拱顶 a 点, σ_{3a}, σ_{1a} 分别为

$$\sigma_{3a} = q \quad \sigma_{1a} = \frac{N}{\sqrt{2}d/2} = \frac{\sqrt{2}qs_a^2}{8fd} \quad (10)$$

根据极限平衡条件式(9),将 σ_{3a}, σ_{1a} 及式(6)代入式(9)得

$$\frac{\sqrt{2}qs_a^2}{8d(qs_a^2\tan\delta)/[4(qs_a - \sqrt{2}c_wd)]} = q\tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (11)$$

化简得

$$s_a = \sqrt{2}d\tan\delta\tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{2\sqrt{2}dc\tan\delta}{q}\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{\sqrt{2}dc_w}{q} \quad (12)$$

拱顶 b 点, σ_{3b}, σ_{1b} 分别为

$$\sigma_{3b} = 0 \quad \sigma_{1b} = \frac{N}{\sqrt{2}d/2} = \frac{\sqrt{2}qs_b^2}{8fd} \quad (13)$$

将式(6)、式(13)代入式(9)得

$$s_b = \frac{\sqrt{2}d}{q}\left[2c\tan\delta\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + c_w\right] \quad (14)$$

拱脚 c 点, σ_{1c}, σ_{3c} 分别为

$$\sigma_{1c} = \frac{F_x}{\sqrt{2}d/2} = \frac{\sqrt{2}qs_c^2}{8fd} \quad \sigma_{3c} = \frac{F_y}{\sqrt{2}d/2} = \frac{qs_c}{\sqrt{2}d} \quad (15)$$

将式(6)、式(15)代入式(9)得

$$s_c = \frac{\sqrt{2}d[2c\tan\delta\tan(45^\circ + \varphi/2) + c_w]}{q[1 - \tan\delta\tan^2(45^\circ + \varphi/2)]} \quad (16)$$

由于 $s_a > s_b$, 舍去 s_a , 取 s_b 与 s_c 中的较小者作为桩间静距。

1.4.2 方桩

拱顶 a 点, σ_{3a}, σ_{1a} 分别为

$$\sigma_{3a} = q \quad \sigma_{1a} = \frac{N}{b} = \frac{qs_a^2}{8fb} \quad (17)$$

根据极限平衡条件式(9),将 σ_{1a}, σ_{3a} 及式(8)代入得

$$\frac{qs_a^2}{8b(qs_a^2\tan\delta)/[4(qs_a - 2c_wb)]} = q\tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (18)$$

化简得

$$s_a = \frac{2b\tan\delta}{q}\left[q\tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{c_w}{\tan\delta}\right] \quad (19)$$

拱顶 b 点, σ_{3b}, σ_{1b} 分别为

$$\sigma_{3b} = 0 \quad \sigma_{1b} = \frac{N}{b} = \frac{qs_b^2}{8fb} \quad (20)$$

将式(8)、式(20)代入式(9)得

$$s_b = \frac{2b\tan\delta}{q}\left[2c\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{c_w}{\tan\delta}\right] \quad (21)$$

拱脚 c 点, σ_{1c}, σ_{3c} 分别为

$$\sigma_{1c} = \frac{F_x}{b} = \frac{qs_c^2}{8fb} \quad \sigma_{3c} = \frac{F_y}{b} = \frac{qs_c}{2b} \quad (22)$$

将式(8)、式(22)代入式(9)得

$$s_c = \frac{2b[c_w + 2c\tan\delta\tan(45^\circ + \varphi/2)]}{q[1 - \tan\delta\tan^2(45^\circ + \varphi/2)]} \quad (23)$$

由于 $s_a > s_b$, 舍去 s_a , 取 s_b 与 s_c 中的较小者作为桩间静距。

由于假定土拱效应自桩顶以下均匀一致,而实际上土拱效应是由上而下逐渐减小的^[2],可见假定与实际之间存在一定误差,计算桩间距偏大。为安全起见,实际应用中可对上述公式计算得出的桩间净距除以适当的安全系数作为实际采用的桩间净距,该安全系数建议选用 1.3 ~ 1.5。

2 工程实例

实例1 安徽淠史杭灌区淠河总干东郢滑坡,采用抗滑桩加固处理,由勘探测得桩周黏性土的黏聚力 $c = 30 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 9^\circ$,拟采用圆桩,桩径 $d = 1.8 \text{ m}$,桩全长 $h = 7.5 \text{ m}$,悬臂段长度 $h_1 = 5.5 \text{ m}$.用传递系数法算得滑坡推力 $P = 56.1 \text{ kN/m}$.

滑坡体为黏性土,设滑坡推力均匀分布,则 $q = 56.1 \times 1/5.5 = 10.20 \text{ kN/m}$,取 $\delta = 5^\circ$, $c_w = c \tan \delta / \tan \varphi = 30 \times \tan 5^\circ / \tan 9^\circ = 16.6 \text{ kPa}$,用式(14)、式(16)计算得 $s_b = 5.68 \text{ m}$, $s_c = 6.45 \text{ m}$,取 $s_b = 5.68 \text{ m}$ 为最大桩间净距,为安全起见,取安全系数为 1.3,则桩间静距为 4.37 m,桩中心距 $L = 6.17 \text{ m}$,实际工程中取 6 m.

实例2^[4] 京珠高速公路粤境北段某工程碎石土高边坡的最下一级边坡采用了悬臂式抗滑桩结构支挡坡体,测得桩后碎石土体的黏聚力 $c = 80 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$.桩截面正面宽度 $a = 2 \text{ m}$,侧面宽度 $b = 3 \text{ m}$,桩全长 $h = 18 \text{ m}$,悬臂段长度 $h_1 = 8 \text{ m}$.用传递系数法算得滑坡推力 $P = 560 \text{ kN/m}$.

滑坡体为碎石土,设滑坡推力均匀分布,则 $q = 560 \times 1/8 = 70 \text{ kN/m}$,取 $\delta = 15^\circ$, $c_w = c \tan \delta / \tan \varphi = 80 \times \tan 15^\circ / \tan 30^\circ = 37 \text{ kPa}$,用式(21)、式(23)计算得 $s_b = 6.36 \text{ m}$, $s_c = 32.39 \text{ m}$,取 $s_b = 6.36 \text{ m}$ 为最大桩间净距,为安全起见,取安全系数为 1.5,则桩间静距为 4.24 m,桩中心距 $L = 6.24 \text{ m}$,实际工程中取 6 m.

3 结 语

本文将土拱的拱脚设为桩侧,以桩侧的摩阻力及土体与桩侧面的黏着力承担滑坡推力的静力平衡条件和土拱跨中与拱脚处截面的强度条件共同控制,建立的抗滑桩间距计算公式力学概念清楚,桩侧的摩阻力与黏着力取值合理.在作用于土拱上的均布荷载取值上,适当地考虑了滑坡推力分布的影响,使计算结果更加符合工程实际.本文计算出的桩间静距可视为上限值,以此值除以适当的安全系数作为实际桩间静距较为合理,具有一定的工程应用价值.

参考文献:

[1] 王士川.抗滑桩间距的下限解[J].工业建筑,1997(10):32-36.
[2] 王成华,陈永波,林立相.抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J].山地学报,2001(6):556-559.
[3] 贾海莉,王成华,李江洪.基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J].工程地质学报,2004,12(1):98-103.
[4] 周培德,肖世国,夏雄.边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J].岩土工程学报,2004(1):132-135.
[5] 李海光.新型支挡结构设计工程实例[M].北京:人民交通出版社,2003.
[6] 顾慰慈.挡土墙土压力计算手册[M].北京:中国建材工业出版社,2005.
[7] 铁道部第二勘测设计院.抗滑桩设计与计算[M].北京:中国铁道出版社,1983.

Determination of anti-slide pile spacing in
side slope consolidation projects

HU Xiao-jun^{1,2}, WANG Jian-guo¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, Hefei 230601, China)

Abstract In consideration of the soil arch effect between anti-slide piles, a calculation formula for the anti-slide pile spacing was developed, taking the following factors as the controlling conditions—the static equilibrium equation of the frictional resistance and adhesive force between the side of piles and slope soil, which sustains the thrusting force of the landside, and the strength conditions at the medial cross-section and two end sections of soil arch. In the formula, the effect of thrusting force distribution was taken into account. Case study shows that the calculation result of the present method is reasonable, and the method is of certain value for engineering application.

Key words side slope consolidation; anti-slide pile; soil arch effect; adhesive force; strength condition; pile spacing