

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.02.07

基于抗滑承载力的单排抗滑桩最大桩间距计算方法

马显春^{1,2}, 上官力²

(1. 四川大学水利水电学院, 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610031)

摘要: 目前关于抗滑桩最大桩间距的研究都是基于桩间土拱效应, 不同计算方法之间的结果区别较大, 更重要的是当滑体黏聚力 $c=0$ 时, 其桩间距计算结果也等于 0, 这显然与实际不符。在利用抗滑桩斜截面受剪承载力计算其最大抗滑承载力的基础上, 根据极限状态下单根桩的最大抗滑承载力恰好等于桩间距范围内滑坡的剩余推力, 推导了基于抗滑桩斜截面受剪承载力的最大桩间距计算公式, 并用工程实例验证了其合理性。结果表明, 当抗滑桩的截面尺寸确定以后, 最大桩间距与设桩处的滑坡剩余推力成反比, 滑坡剩余推力越大, 桩间距越小, 反之亦然。本方法计算简便, 利于推广。

关键词: 抗滑桩; 桩间距; 斜截面的受剪承载力; 最大抗滑承载力; 剩余推力

中图分类号: TU4; P642.22; X43

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)02-0043-05

Calculation method of the maximum distance of anti-slide piles in one row based on its capacity of shearing resistance

MA Xianchun^{1,2}, SHANGGUAN Li²

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and

Hydropower, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. China Railway Southwest

Research Institute CO., LTD, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Current calculation methods of the maximum spacing between two adjacent anti-slide piles are based on the soil arch effect, and different calculation methods are with different results. what is disaccord with the fact is that when cohesive force $c=0$ of the landslide, the calculated maximum pile spacing is also 0. This paper calculates the maximum anti sliding resistance capacity based on the shear resistance capacity on the oblique section of the anti-slide pile. Taking into consideration that the maximum anti-slide resistance capacity of signal pile is exactly equal to the residual thrust within the pile spacing, so the formula applied to calculate the maximum spacing were deduced based on the shear resistance capacity on the oblique section of the anti-slide piles, and the rationality of the formula was verified by a practical engineering project. The results show that when the section size of the anti-slide pile is determined, the maximum pile spacing is inversely proportional to the residual thrust at the pile site, the larger the residual thrust, the smaller the anti-slide pile spacing, and vice versa. This calculation method is simple and convenient to promote.

Keywords: anti-slide piles; piles spacing; shear resistance capacity of oblique section; maximum anti-slide resistance capacity; residual thrust of the landslide

收稿日期: 2017-08-17; 修订日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流项目(41661134012)

第一作者: 马显春(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事边坡工程与地质灾害防治技术研究。E-mail: maxianchun1980@163.com

0 引言

在滑坡治理过程中,抗滑桩作为一种主要的支挡结构物被广泛应用。确定桩间距,是抗滑桩设计的一个重要内容。合适的桩间距应该使桩间滑体具有足够的稳定性,在下滑力作用下,不致从桩间挤出。目前抗滑桩桩间距的确定方法主要是基于桩间滑体的土拱效应,桩间土拱在受到滑坡推力作用后,立即将大部分滑坡推力传递到相邻两抗滑桩的侧面上,此时,抗滑桩背及侧面和桩间土拱共同承担滑坡剩余推力(图1)。

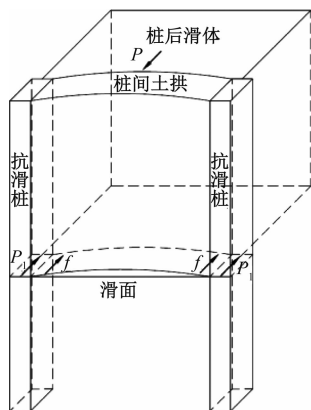


图1 桩间土拱受力模型

Fig.1 Mechanical model of soil arch between anti-slide piles

图中： P ——桩间滑体的剩余下滑力/kN；

f ——桩侧摩阻力/kN；

P_1 ——桩身作用在滑体上的水平支撑力/kN。

众多学者对抗滑桩桩间土拱力学性质与最大桩间距的问题做了大量的研究工作。

王士川等(1997)^[1]、王成华等(2001)^[2]以桩间水平土拱为研究对象,从“桩间土体与两桩侧面所产生的摩阻力不小于桩间的滑坡推力”这一桩间土拱静力平衡条件出发,建立了桩间距计算模型。在此基础上,冯君等(2003)^[3]利用普氏理论推导了桩间距计算公式;李长冬等(2010)^[4]增加了土拱的强度控制条件,建立了桩间距计算公式。

周德培等(2004)^[5]针对开挖边坡工程情况,以桩后水平土拱为研究对象,假定相邻两桩间土拱为对称轴在跨中的抛物线形,并提出以桩间土拱静力平衡、跨中截面强度及拱脚截面强度为控制条件来确定桩间距,推导了桩间距计算公式。在此基础上,肖世国等(2015)^[6]假定桩土间受压区形状为倒梯形,结合桩计算宽度、桩土间变形协调条件,得出了桩间距的计算公式。

贾海莉等(2004)^[7]、郑磊等(2005)^[8]、周应华等(2006)^[9]、蒋良潍等(2006)^[10]、胡晓军等(2007)^[11]、叶代成(2008)^[12]以桩后水平土拱为研究对象,假定相邻两桩间土拱为对称轴在跨中的抛物线形,并提出以桩间土拱静力平衡、土拱强度为控制条件来确定桩间距,推导了计算公式。赵明华等(2006)^[13]、(2010)^[14]分别以桩后水平土拱和倾斜土拱为研究对象,假定相邻两桩间土拱为对称轴在跨中的抛物线形,考虑桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件及拱脚截面强度条件,建立了桩间距的计算方法。周文权等(2014)^[15]、邱子义等(2016)^[16]提出桩后土拱及桩侧土拱同时存在并共同受力,根据桩受到的侧摩阻力等于桩间滑坡推力的平衡条件,推导了桩间距计算公式。

上述研究都是以周德培等(2004)的分析模型为基础,或者采用不同的强度准则,或者对桩间距主要影响因素进行具体分析,但其计算结果区别较大^[6],其中有些计算公式较复杂不适合工程技术人员使用。更重要的是上述桩间净距的计算公式都与滑坡体的黏聚力和内摩擦角有关,当黏聚力等于零时,其桩间净距计算结果也等于零,这显然与实际不符。对于桩后为以内摩擦角为主的无黏性土时,在合理的桩间距情况下,桩间也可以形成土拱效应。

滑坡防治工程设计与施工技术规范(DZ/T 0219—2006)^[17]中规定,抗滑桩间距(中对中)宜为5~10 m。地质灾害防治工程设计与施工规范(DB 50/5029—2004)^[18]中规定,抗滑桩间距应根据滑体土性质确定,一般取桩宽(或桩径)的3~5倍。铁路路基支挡结构设计规范(TB 10025—2006)^[19]中规定,抗滑桩的桩间距宜为6~10 m。文献[20]中提到,我国已建工程的桩间距,最小为4 m,最大为15 m,一般为6~10 m。公路路基设计规范(JTG D30—2015)^[21]中规定,合适的桩间距应保证滑坡体不越过桩顶或从桩底和桩间滑动。由此可见,各行业规范对桩间距的规定也不尽相同。

综合上述分析,桩间距问题目前还没有得到比较满意的解决。因此,本文旨在寻求一种简单实用、可参考性强的抗滑桩合理桩间距计算方法。

当抗滑桩按其最大桩间距布置时,单根桩的极限抗滑力恰好等于桩间距范围内滑坡的剩余下滑力,此时桩的承载力以及滑坡体的抗滑力都得到了充分发挥^[22]。因此,只要能计算出单根桩的极限抗滑力以及设桩处的剩余下滑力,就可以计算出最大桩间距值。

1 抗滑桩最大抗滑承载力计算

抗滑桩属受弯构件,其弯矩与滑坡推力、桩前滑体抗力、滑床抗力及配筋等多因素有关,其最大抗滑承载力用弯矩来确定相对较复杂,因此,本文利用抗滑桩斜截面的受剪承载力来确定其最大抗滑承载力。

抗滑桩截面通常为矩形,根据混凝土结构设计规范(GB 50010—2010)^[23]的规定,矩形截面受弯构件的受剪截面应符合下列条件:

当 $h_0/b \leq 4$ 时,

$$Q \leq 0.25\beta_c f_c b h_0 \quad (1)$$

式中: Q ——构件斜截面上的最大剪力设计值/N;

β_c ——混凝土强度影响系数:混凝土强度等级不超过 C50 时,取 1.0;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值/(N·mm⁻²),取值见表 1;

b ——矩形截面垂直滑坡主滑方向的宽度/mm;

h_0 ——矩形截面平行滑坡主滑方向的有效高度/mm,通常取矩形截面平行滑坡主滑方向的高度 h 与混凝土保护层厚度 c 的差值。

表 1 混凝土轴心抗压强度设计值

Table 1 Design value of axial compressive strength of concrete

强度	混凝土强度等级							
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1

根据滑坡推力大小和分布形式、地形及地层性质,拟定抗滑桩的截面尺寸,并计算最大剪力及其部位。在最大剪力值满足式(1)时,即可利用以下方法计算抗滑桩斜截面的受剪承载力:

仅配置箍筋的矩形截面受弯构件,其斜截面受剪承载力应符合下列规定:

$$Q \leq 0.7f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (2)$$

式中: f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值/(N·mm⁻²),取值见表 2;

f_{yv} ——箍筋的抗拉强度设计值/(N·mm⁻²),取值见表 3;

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积/mm²;

s ——沿构件长度方向的箍筋间距/mm。

式(2)取等号即为抗滑桩的最大抗滑承载力。

表 2 混凝土轴心抗拉强度设计值

Table 2 Design value of axial tensile strength of concrete

强度	混凝土强度等级							
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89

表 3 普通钢筋抗拉强度设计值

Table 3 Design value of tensile strength of ordinary steel bar

牌 号	抗拉强度设计值/(N·mm ⁻²)
HPB300	270
HRB335	300
HRB400、HRBF400、RRB400	360
HRB500、HRBF500	435

2 抗滑桩的最大桩间距确定

根据式(2)确定的抗滑桩最大抗滑承载力,结合传递系数法计算的滑坡设桩处的剩余推力,可以确定抗滑桩的最大桩间距,即:

$$S = \frac{Q}{P_i} \quad (3)$$

式中: S ——抗滑桩中至中的最大间距/m;

P_i ——设桩处的剩余推力/(kN·m⁻¹)。

将式(2)取等号,代入式(3),可得:

仅配置箍筋时,抗滑桩的最大桩间距为

$$S = \frac{0.7f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0}{P_i} \quad (4)$$

通过上述分析可以看出,抗滑桩的截面尺寸确定以后,其斜截面的受剪承载力即为定值,最大桩间距与设桩处的滑坡剩余推力成反比,滑坡剩余推力越大,桩间距越小,反之亦然。

3 实例分析与工程应用

利用文献[6]的工程实例来验证本文所提方法的合理性。川北某高速公路路堑堆积体高边坡,采用悬臂式抗滑桩支挡。桩身截面宽 2 m、高 3 m,桩总长 22 m,锚固段长 11 m,桩身采用 C30 混凝土浇筑,混凝土保护层厚度 100 mm。用传递系数法计算设桩处的剩余推力为 1 050 kN/m;桩身最大剪力为 5 250 kN。

验算截面尺寸:

$$0.25\beta_c f_c b h_0 = 0.25 \times 1 \times 14.3 \times 2\,000 \times 2\,900 = 20\,735\,000 \text{ N} = 20\,735 \text{ kN} > 5\,250 \text{ kN}$$

截面尺寸满足要求。

验算是否按计算配箍筋:

$$0.7f_tbh_0 = 0.7 \times 1.43 \times 2\,000 \times 2\,900 =$$

$$5\,805\,800\text{ N} = 5\,805.8\text{ kN} > 5\,250\text{ kN}$$

抗滑桩的设计剪力小于混凝土提供的抗剪能力,只需配置构造箍筋。

对抗滑桩来说,构造配箍筋通常采用两肢箍 HRB335 ϕ 16@200,则按式(4)计算的最大桩间距 $S = (5\,805.8 + 1\,748.352)/1\,050 = 7.2\text{ m}$ 。实际工程中为简化操作并保证安全,可取桩间距为 7 m。根据文献[6]的叙述,该工程实际采用了 6 m 的桩间距,工程竣工后运营状况良好,这在一定程度上说明了本文所提算法具有可参考性。

表 4 列出了不同方法计算的最大桩间距结果。本文的计算结果与文献[6]的结果比较接近,也更接近于实际工程采用的 6 m 桩间距的情况。

表 4 不同方法计算的最大桩间距结果统计表

Table 4 The calculated maximum pile spacing of existing methods and the proposed method

方法	王成华等 ^[2]	李长冬等 ^[4]	周德培等 ^[5]	肖世国等 ^[6]	周应华等 ^[9]
桩间距/m	8.7	10.0	4.9	7.6	4.8
方法	蒋良淮等 ^[10]	胡晓军等 ^[11]	叶代成 ^[12]	赵明华等 ^[14]	本文
桩间距/m	9.0	4.7	12.6	5.0	7.2

表 5 不同滑坡剩余推力与桩截面尺寸下的最大桩间距/m

Table 5 The maximum pile spacing between calculated with different residual thrust and pile section size/m

桩截面尺寸	剩余推力								
	1 000 kN	1 250 kN	1 500 kN	1 750 kN	2 000 kN	2 250 kN	2 500 kN	2 750 kN	3 000 kN
1.5 m×2.0 m	4.0	/	/	/	/	/	/	/	/
1.8 m×2.5 m	5.8	4.6	/	/	/	/	/	/	/
2.0 m×3.0 m	7.6	6.0	5.0	4.3	/	/	/	/	/
2.5 m×3.5 m	10.6	8.4	7.0	6.0	5.3	4.7	4.2	/	/
3.0 m×4.0 m	/	/	9.4	8.0	7.0	6.3	5.6	5.1	4.7

注:抗滑桩桩身混凝土强度等级取 C30,混凝土保护层厚度取 100 mm,箍筋按构造配置。

5 结语

抗滑桩的桩间距问题,目前还没有得到比较满意的解决。本文利用抗滑桩斜截面的受剪承载力计算了其最大抗滑承载力;并根据极限状态下,单根桩的最大抗滑承载力恰好等于桩间距范围内滑坡的剩余推力,推导了基于抗滑桩斜截面受剪承载力的最大桩间距计算公式,并用工程实例验证了其合理性。本文的抗滑桩桩间距计算方法简单实用,适合在实际工程中推广应用。

4 最大桩间距与桩身截面尺寸的合理匹配

由式(4)可知,当滑坡剩余推力确定后,可通过增大抗滑桩截面尺寸的方法来获得较大的桩间距,进而节省工程投资。但抗滑桩桩身截面尺寸也不能无限增大。若滑坡土体结构松散、压缩性大,在重力及滑坡推力作用下土体本身要发生较大的压缩变形。如果较大的压缩变形不能作用在抗滑桩上,则滑坡土体就会在桩间产生滑移变形或流动。所以不能无限加大抗滑桩的截面尺寸尤其是侧面高度来达到增大桩间距、节省工程投资的目的。

根据实践经验,在抗滑桩设计过程中,可先确定桩间距,而后用式(4)采用迭代法计算桩身截面尺寸。抗滑桩的截面宽度一般为 1.5~3.0 m,截面高度一般为 2.0~4.0 m,宽高比一般在 0.65~0.75。常用的抗滑桩截面尺寸为 1.5 m×2.0 m、1.8 m×2.5 m、2.0 m×3.0 m、2.5 m×3.5 m、3.0 m×4.0 m 等,尤以 2.0 m×3.0 m 最为多见。桩间距一般取 5~10 m。当滑体完整、密实或滑坡剩余推力较小时,桩间距可取大些;反之,应取小些。通常滑坡主轴附近桩间距小,两侧桩间距大。

下面将滑坡不同剩余推力与不同抗滑桩截面尺寸下的最大桩间距列于表 5,工程中可直接查表应用或用内插法计算抗滑桩的最大桩间距。

参考文献:

- [1] 王士川,陈立新. 抗滑桩间距的下限解[J]. 工业建筑,1997,27(10):32-36.
WANG Shichuan, CHEN Lixin. Anti-slide pile spacing of the lower limit equation [J]. Industrial Construction, 1997, 27(10): 32-36.
- [2] 王成华,陈永波,林立相. 抗滑桩间土拱特性及最大桩间距分析[J]. 山地学报,2001,19(6):556-559.
WANG Chenghua, CHEN Yongbo, LIN Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable space between

- one another anti-sliding pile[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(6): 556 - 559.
- [3] 冯君, 吕和林, 王成华. 普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 79 - 81.
- FENG Jun, LYU Helin, WANG Chenghua. Application of M. M. PROMOJIYFAKONOV theory to solution of distance between anti-slide piles[J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 79 - 81.
- [4] 李长冬, 唐辉明, 胡新丽, 等. 基于土拱效应的改进抗滑桩最大桩间距计算模型[J]. 地质科技情报, 2010, 29(5): 121 - 124.
- LI Changdong, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Improved maximum pile interval model of anti-slide pile based on soil arching effect[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(5): 121 - 124.
- [5] 周德培, 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, 26(1): 132 - 135.
- ZHOU Depei, XIAO Shiguo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 132 - 135.
- [6] 肖世国, 程富强. 再论悬臂式抗滑桩合理桩间距的计算方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 111 - 116.
- XIAO Shiguo, CHENG Fuqiang. Further discussion on calculation method of rational spacing between two adjacent cantilever piles for stabilizing slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 111 - 116.
- [7] 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.
- JIA Haili, WANG Chenghua, LI Jianghong. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and pertaining piles in accordance with soil arching effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 98 - 103.
- [8] 郑磊, 殷坤龙, 简文星, 等. 抗滑桩设计中关于确定桩间距问题的分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 71 - 74.
- ZHENG Lei, YIN Kunlong, JIAN Wenxing, et al. Analysis on spacing between piles in the design of anti-slide pile[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(6): 71 - 74.
- [9] 周应华, 周德培, 冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 455 - 462.
- ZHOU Yinghua, ZHOU Depei, FENG Jun. Geometrically mechanical characters of soil arch between two adjacent laterally loaded piles and determination of suitable pile spacing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 455 - 462.
- [10] 蒋良潍, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 445 - 450.
- JIANG Liangwei, HUANG Runqiu, JIANG Zhongxin. Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 445 - 450.
- [11] 胡晓军, 王建国. 边坡加固工程中抗滑桩间距的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 330 - 333.
- HU Xiaojun, WANG Jianguo. Determination of anti-slide pile spacing in side slope consolidation projects[J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2007, 35(3): 330 - 333.
- [12] 叶代成. 抗滑桩桩间土拱效应及合理桩间距的研究[J]. 土工基础, 2008, 22(4): 75 - 79.
- YE Daicheng. The research of the soil arching effective between anti-sliding piles and suitable pile spacing[J]. Soil Eng. and Foundation, 2008, 22(4): 75 - 79.
- [13] 赵明华, 陈炳初, 刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J]. 中南公路工程, 2006, 31(2): 1 - 3.
- ZHAO Minghua, CHEN Bingchu, LIU Jianhua. Analysis of the spacing between anti-slide piles considering soil-arch effect[J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(2): 1 - 3.
- [14] 赵明华, 廖彬彬, 刘思思. 基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1211 - 1216.
- ZHAO Minghua, LIAO Binbin, LIU Sisi. Calculation of anti-slide piles spacing based on soil arching effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1211 - 1216.
- [15] 周文权, 冷伍明, 阮波, 等. 考虑桩土相互作用的抗滑桩临界桩间距研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(3): 83 - 87.
- ZHOU Wenquan, LENG Wuming, RUAN Bo, et al. Research of critical pile spacing of anti-slide pile considering the interaction of pile and soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(3): 83 - 87.