

任永忠,朱彦鹏.基于桩间土滑动特性的合理桩间距研究[J].地震工程学报,2020,42(6):1590-1597.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1590

REN Yongzhong, ZHU Yanpeng. Rational Spacing between Anti-slide Piles Based on Sliding Characteristic of Soil between Piles [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1590-1597. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1590

基于桩间土滑动特性的合理桩间距研究

任永忠¹, 朱彦鹏^{2,3}

- (1. 兰州工业学院 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;
3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为研究抗滑桩合理桩间距以及荷载传递机制, 首先以桩侧摩阻力为拱脚时的破裂面推导出以桩身为拱脚时的破裂角计算公式; 然后引入对数螺旋线法确定桩间土体的滑移深度, 以土拱效应为基础建立计算模型, 求解考虑桩间土体滑移深度的合理桩间距表达式; 最后对桩间净距的主要影响因素进行分析, 包括滑坡推力、黏聚力、桩截面宽度以及高度。研究表明: 由桩身和桩侧摩阻力同时作为土拱拱脚更符合实际受力状态, 同时求得的土拱拱圈厚度和矢高小于以桩身为拱脚条件下相应值而大于以桩侧摩阻力为拱脚条件下的相应值, 并且随桩埋深的增加而增大。

关键词: 抗滑桩; 桩间距; 土拱效应; 土拱拱脚; 影响因素

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1590-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1590

Rational Spacing between Anti-slide Piles Based on Sliding Characteristic of Soil between Piles

REN Yongzhong¹, ZHU Yanpeng^{2,3}

- (1. College of Civil Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
3. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The reasonable spacing between anti-slide piles and the load transfer mechanism was investigated in this study. First, the calculation formula of the rupture angle with the skewback of a soil arch supported by a pile body was deduced from the fracture surface with the skewback supported by the side friction. Second, the logarithmic spiral method was introduced to determine the slip depth of soil between piles. The calculation model was established based on the soil arching effect to solve the expression of reasonable spacing between anti-slide piles considering the slip

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 甘肃省陇原青年创新创业人才(团队)项目(2020RCXM196); 甘肃省高等学校创新能力提升项目(2019B-180); 兰州工业学院“启智”人才培养计划基金(2019QZ-05); 兰州工业学院校级岩土工程重点学科(2019XK-04)

第一作者简介: 任永忠(1986—), 甘肃灵台人, 博士, 副教授, 主要从事基坑、边坡支挡结构及滑坡防治的研究工作。

E-mail: renyz518@163.com。

depth of the soil between piles. Finally, the major influencing factors of the net spacing between anti-slide piles were analyzed, including the landslide thrust, the cohesion, and the width and height of the anti-slide pile section. The results showed that the skewback of the soil arch supported by the pile body and pile side friction was more in line with the actual stress state; moreover, under this condition, the ring thickness and vector height of soil arch, which increased with the pile depth, were less than those of the soil arch supported by the pile body but more than those of the soil arch supported by the pile side friction.

Keywords: anti-slide pile; pile spacing; soil arching effect; skewback of soil arching; influencing factor

0 引言

在滑坡防治治理工程中,抗滑桩是应用最为广泛的一种支挡结构,其支挡理念为采用非连续结构,利用土体自身强度和变形形成的土拱将滑坡推力通过桩身传递于稳定的基岩中以达到抗滑的目的。桩间距是否合理直接影响土拱能否形成,桩间距过大会使滑坡岩土体从桩间挤出,其值过小则会增加工程造价,也不能有效运用土体自身强度抵抗滑坡推力,因此研究合理的桩间距具有重要意义。

目前针对合理桩间距的研究主要采用理论分析、试验研究以及数值模拟三种方法。在理论分析方面,主要以滑坡推力与抗滑力的力学平衡、土拱拱脚和土拱跨中土体破坏强度为基本条件建立相应的计算模型,在研究过程中还考虑了拱脚的不同形式以及边坡倾角等影响因素^[1-6]。在试验中,主要采用室内试验及离心模型并通过施加水平推力的方式研究桩身处土压力的大小、桩截面以及在不同桩间距条件下桩后土体应力的分布形式^[7-9]。在数值分析方面,主要是采用有限元和离散元针对土拱的形成过程以及不同桩间距条件下土拱应力的大小进行研究^[10-15]。但以上分析研究均建立在水平拱的基础上,没有考虑土拱的空间分布特性。

文献[16]通过人工斜坡原位试验验证了土拱在空间的分布形态,否定了之前研究认为桩间土拱特性随深度变化不变的结论。基于此,本文针对抗滑桩受力结构体系,首先基于桩侧摩阻力作为拱脚时的破裂面推导桩身作为拱脚时的破裂角;其次采用对数螺旋线法确定桩间土的滑动面深度,并进一步确定土拱拱圈的厚度;最后分析影响桩间距的主要因素,以期为进一步基于土拱效应确定桩间距受力机理提供理论参考。

1 合理拱轴线的确定

布置抗滑桩的目的是为了阻止滑坡体在滑坡推力作用下变形,其桩身位置处变形很小,桩间部位变

形较大,满足土拱形成的必备条件^[17]。土拱的形成过程是岩土体调整自身内力分布的过程。土拱效应主要利用土体抗压性能好、抗拉性能差的特点,是土体变形后受力自我优化调整的结果。因此在滑坡推力作用下土拱的形状可认为是合理拱轴线,合理拱轴线上每一截面的弯矩和剪力都为零,只受到压力的作用,适合于土体抗压性能好的特点^[2]。

依据结构力学中拱结构的相关知识求解内力,由于拱为轴对称结构,故计算模型取对称轴左边结构进行受力分析。坐标原点 x 取自拱的跨中, y 取在拱的矢高 f 与抗滑桩截面高度 h 之和的位置处,拱顶上承受均布荷载 p 时,拱的净跨为 l' 。所选土拱结构的受力分析如图 1 所示。

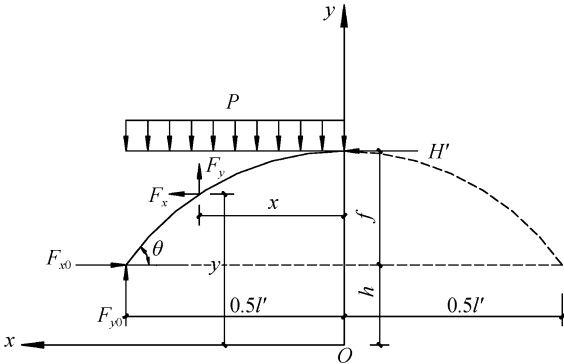


图 1 土拱受力分析图

Fig.1 Force analysis diagram of soil arching

如图 1 所示,拱中任一截面 x 处的内力为:

$$\begin{cases} F_x = \frac{pl'^2}{8f} \\ F_y = px \end{cases} \tag{1}$$

拱脚处的内力为:

$$\begin{cases} F_{x0} = \frac{pl'^2}{8f} \\ F_{y0} = \frac{1}{2} pl' \end{cases} \tag{2}$$

依据拱轴线方程可求得拱轴线与水平方向的夹角关系式:

$$\tan\alpha_0 = y'|_{x=\frac{l'}{2}} = \left(\frac{l'^2 - 4l'}{l'^2}\right)f + h \tag{3}$$

2 桩身背侧处拱圈破裂角的确定

抗滑桩的截面形式通常为矩形和圆形,本文采用矩形截面进行分析,圆形截面取内接四边形。设抗滑桩矩形截面高度为 h ,宽度为 b ,桩间净距为 l' , E 为土拱中轴线下侧边缘处一点。

从土拱的位置关系来确定破裂面,土拱的拱脚受力由两部分组成,一部分为桩身背侧,另一部分为桩侧摩阻力。首先确定桩侧土拱的破裂角,当滑体处于极限平衡状态时土拱也处于极限平衡状态,此时土拱主要承受沿拱轴线方向的力和竖直方向土拱的自重。由于土拱沿拱轴线方向上所承受的力大于竖直方向土拱的自重,因此沿拱轴线方向的应力为 σ_1 ,由Mohr-Coulomb强度准则可知,破裂面与大主应力 σ_1 的作用面的夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ (φ 为岩土体的内摩擦角),即可确定由桩侧摩阻力作为拱脚时的破裂面。

由于滑坡土体为颗粒物,依据颗粒物的特性以及应力传递路径,假设破裂面存在时,必定是破裂面上的剪应力已超过土体的抗剪强度指标,其土体的变形已成为塑性变形,类似于土质边坡工程中的滑裂面。其滑裂面不可能出现硬折线形,其中一个判别条件为等效塑性应变区贯通,因此由桩侧摩阻力作为拱脚确定的破裂面将延伸至由桩身背侧形成土拱的边线上,即 M 点(图2)。

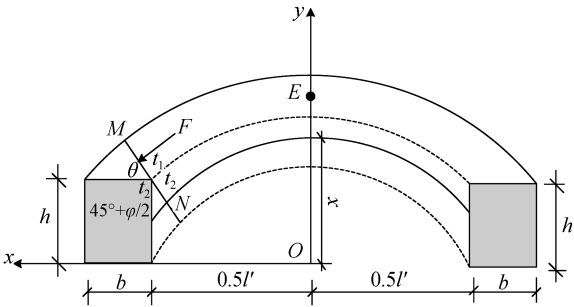


图2 滑坡土拱受力分析图

Fig.2 Force analysis diagram of landslide arching soil

依据几何关系可知,以桩侧摩阻力为拱脚时桩身后侧土体的破裂面角度 θ 为:

$$\theta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \tag{4}$$

3 考虑桩间土滑移深度的桩间距确定

3.1 桩身背侧为拱脚时土拱拱圈厚度的确定

如图2所示,文献[1]假定 M 点位于桩宽 b 中点

竖向的延长线上,通过几何关系可得桩身背侧为拱脚时土拱拱圈的厚度为:

$$t_1 = \frac{b}{2\cos\theta} \tag{5}$$

将式(4)代入式(5)可得:

$$t_1 = \frac{b}{2\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \tag{6}$$

3.2 滑动面深度的确定

文献[16]通过试验分析得知两桩之间的桩间土滑移面为一圆弧滑动面,同时土拱作用区域由于土颗粒在滑坡推力作用下的楔紧作用,致使桩间土的滑动面位于直接土拱作用的拱圈内侧区域。在边坡稳定性分析中,对于碎裂状或散体结构的岩土体,边坡开挖后可能出现曲面型滑面,其确定滑面的常用方法之一为对数螺旋线法,本文采用该方法确定滑动面深度。

滑动面在平面内为一对数螺旋线,其方程为^[18]:

$$r = ae^{\Phi\tan\varphi} \tag{7}$$

$$a = \frac{H}{e^{\Phi_2\tan\varphi}\sin\Phi_2 - e^{\Phi_1\tan\varphi}\sin\Phi_1} \tag{8}$$

$$\Phi_1 = \varphi + 3^\circ \tag{9}$$

$$\Phi_2 = 90^\circ + \varphi - 0.816\varphi + 0.503 \tag{10}$$

式中: r 为螺旋线半径; Φ 为螺旋线的半径 r 和水平线的夹角; H 为坡面的高度,在本文中即滑动面的深度。

将式(8)代入式(7)可得极坐标下的滑动面方程:

$$r = \frac{H}{e^{\Phi_2\tan\varphi}\sin\Phi_2 - e^{\Phi_1\tan\varphi}\sin\Phi_1}e^{\Phi\tan\varphi} \tag{11}$$

设 x_0 、 y_0 为对数螺旋线的坐标原点,由下式确定:

$$\begin{cases} x_0 = ae^{\Phi_1\tan\varphi}\cos\Phi_1 \\ y_0 = ae^{\Phi_2\tan\varphi}\sin\Phi_2 \end{cases} \tag{12}$$

由图3和几何位置关系可知桩间土滑动面的水平距离 x ,即滑动面深度为:

$$x = r\cos\Phi - (x_0 - b) \tag{13}$$

在图1中虽然采用拱轴线代替整个拱,但是土拱拱圈具有一定的厚度,因此假定拱轴线位于拱圈中心处。同时依据图2几何关系可知,考虑滑移面深度影响时桩侧摩阻力为拱脚的情况下拱脚厚度 t'_2 为:

$$t'_2 = \frac{t_2}{2} + f_2 - x \tag{14}$$

式中: t'_2 为考虑滑移面深度影响时桩侧摩阻力为拱脚情况下的拱圈厚度; t_2 为桩截面高度 h 全部为拱脚时的拱圈厚度; f_2 为桩截面高度 h 全部为拱脚时的土拱矢高; x 为桩间土滑移面的水平尺寸。

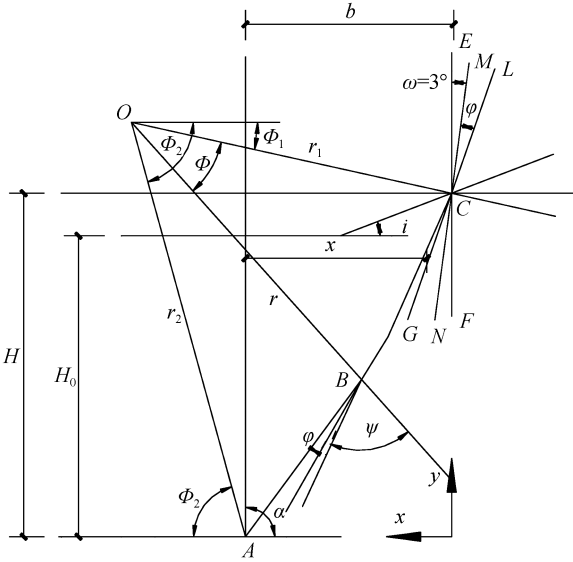


图 3 对数螺旋形滑面示意图

Fig.3 Sketch of logarithmic spiral sliding surface

由文献[19]可知,桩截面高度 h 全部为拱脚时的土拱矢高 f_2 、 t_2 分别为:

$$\left. \begin{aligned} f_2 &= \frac{hc}{2p} \cdot \frac{\tan(45^\circ + \varphi/2)}{1 - \tan\varphi \tan(45^\circ - \varphi/2)} \\ t_2 &= h \cos(45^\circ + \varphi/2) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: c 为岩土体的黏聚力。

因此桩身背侧和桩侧摩阻力同时看作拱脚时,整个土拱拱圈的厚度为:

$$t_3 = t_1 + t'_2 \quad (16)$$

3.3 桩间距的求解

桩间距的求解需满足跨中和拱脚处土体的强度破坏准则,同时还需满足滑坡推力在平面上的静力平衡方程。

拱脚处的受力可通过结构力学的相关知识求解,图 4 为拱脚的受力分析图。

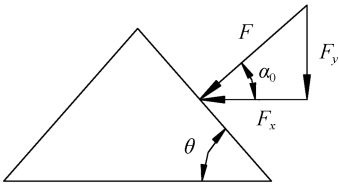


图 4 桩身拱座受力图

Fig.4 Force diagram of arch support

图 4 中 F_x 与 F_y 的夹角 α_0 为:

$$\tan\alpha_0 = \frac{F_y}{F_x} = \frac{4f_3}{l' + b} \quad (17)$$

式中: f_3 为整个土拱中心线处矢高。

如图 2 所示,针对破裂面 MN,依据 Mohr-Coulomb 破坏准则,可建立如下方程:

$$F \cos\left(\alpha_0 + 45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = F \sin\left(\alpha_0 + 45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \tan\varphi + ct_3 \quad (18)$$

式中: ϕ 为桩土界面的摩擦角。

由于土拱的跨中截面受力为最不利,为满足土体的强度条件,在分析过程中假定土拱前侧的土体对土拱没有支撑力,因此土拱 E 点为最不利点。依据土体在塑性极限平衡状态下的方程可得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (19)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为大小主应力。

由于 E 点处 σ_3 作用的方向为土拱前侧土体的支撑力方向,假定土拱前侧土体已滑塌,因此 σ_3 的作用力不存在,进一步可得:

$$\sigma_1 = \frac{F_x}{t_3 \cdot 1} = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (20)$$

式中: F_x 为土拱轴线的轴力。

将式(1)中 F_x 代入式(20)可得:

$$\frac{p(l' + b)^2}{8t_3 f_3} = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (21)$$

桩间土拱在水平面方向要正常发挥土拱作用,还必须满足桩间土的静力平衡条件,即作用在桩间土拱上的坡体压力要小于两桩侧摩阻力之和,否则桩间土会被挤出,因此可得:

$$2(F_x \tan\varphi + ct_3) = p(l' + b) \quad (22)$$

将式(20)代入式(22)中,可得考虑桩间土滑塌情况下桩间距:

$$l'_3 = \frac{2\left(2t_3 c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \tan\varphi + ct_3\right)}{p} - b \quad (23)$$

$$\alpha = -2\arctan\left(\frac{B - \sqrt{B^2 - A^2 + 1}}{A + 1}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (24)$$

式中: $A = ct_3/F$, F 为破裂面上的合力; $B = \tan\varphi$ 。

然后将式(23)、(24)代入式(17),可得土拱拱圈总矢高:

$$f_3 = \frac{\left(2t_3 c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \tan\varphi + ct_3\right)}{2p} \cdot \tan\varphi \quad (25)$$

4 工程实例分析

锁儿头滑坡位于舟曲县城西侧约 1.0 km 处的

白龙江北岸,滑坡全长 3 300 m,最宽处 700 m,最窄处仅有 80 m,总面积约 $126\times 10^4\text{ m}^2$,堆积体平均坡度 12° ,主滑方向 133° ,堆积体厚度 20~100 m 不等,体积 $7\,285\times 10^4\text{ m}^3$ 。前后缘相对高差 670 m,属特大型断层破碎带滑坡。该滑坡岩土体为软硬相

间的层状、薄层状碳酸盐岩和碎屑岩岩组,由泥盆系岩层组成,岩性主要有千枚岩、板岩及灰岩等。同时软弱夹层的存在使斜坡易产生蠕滑-弯曲、蠕滑-拉裂变形破坏,形成大规模滑坡体。滑面处的岩质见图 5。

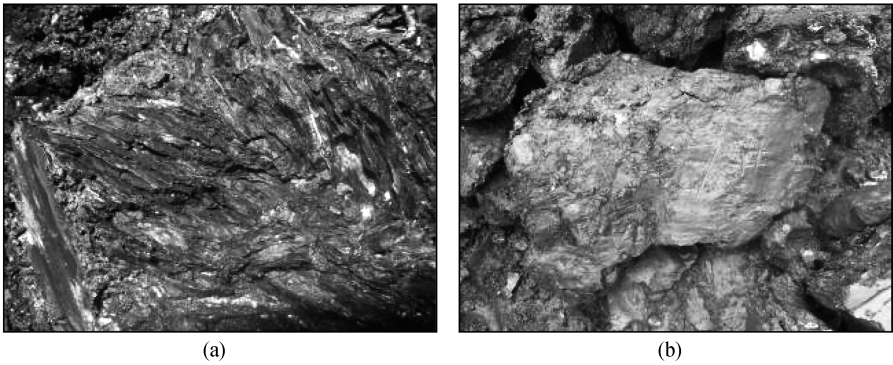


图 5 滑动面处岩质
Fig.5 Rock of sliding surface

依据《甘肃省舟曲县锁儿头滑坡防治工程施工图设计》^[20]可知,滑体主要由碳质板岩构成,其黏聚力 c 为 60 kPa,内摩擦角 φ 为 31° 。经初步设计,确定采用悬臂矩形抗滑桩支护,桩截面为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的矩形,长为 30 m,其滑动面深度为 18 m,即抗滑桩的悬臂段长度为 18 m。采用传递系数法确定滑坡推力为 1 703 kN/m,桩后滑坡推力分布形式采用矩形分布,沿桩深作用在单位厚度土层的滑坡推力为 $1\,703/18=94.6\text{ kN/m}$ 。

本文采用文献[1]和文献[19]分别计算桩身为拱脚和桩侧摩阻力为拱脚时的桩间距 l 、土拱矢高 f 以及拱圈厚度 t ,同时与本文所用计算方法进行对比,将结果列于表 1。

表 1 三种计算方法的比较(单位:m)			
Table 1 Comparison of three methods (Unit:m)			
拱脚位置	土拱矢高 f	桩间净距 l'	土拱拱圈 厚度 t
桩身为拱脚 ^[1]	0.88	3.99	1.01
桩侧摩阻力为拱脚 ^[19]	2.55	5.77	0.98
本文计算方法(两者联合)	1.67	3.89	1.49

由表 1 可知,在三种不同的计算方法中,当桩侧摩阻力为拱脚时土拱矢高最大,桩身为拱脚时土拱矢高最小,而本文计算方法得出的土拱矢高处于中间。桩间距在桩侧摩阻力为拱脚时最大,其他两种方法计算得出的桩间距基本相等。土拱拱圈厚度以两者联合作为拱脚时最大,将桩身和桩侧单独为拱脚时的土拱拱圈厚度相加之和(1.99 m)大于两者联合作为拱脚时土拱拱圈厚度(1.49 m),这是因为考

虑了桩间土的滑移深度。如果不考虑滑移深度,整个桩截面高度全为拱脚,但实际上有一部分已滑移,不能参与土拱拱脚的受力。针对本工程,滑移深度的参与使土拱拱圈的厚度减小了 0.5 m,桩截面高度为 3.0 m,占整个桩截面高度的 16.67%。

图 6 为土拱矢高、桩间净距及拱圈厚度随桩的埋深变化曲线。从图中可以看出,由于考虑桩间土滑移深度的影响,随着桩的埋深增加,土拱矢高、桩间净距及拱圈厚度都随之增大,其中土拱矢高和拱圈厚度增大比例基本相同,而桩间净距增大幅度较

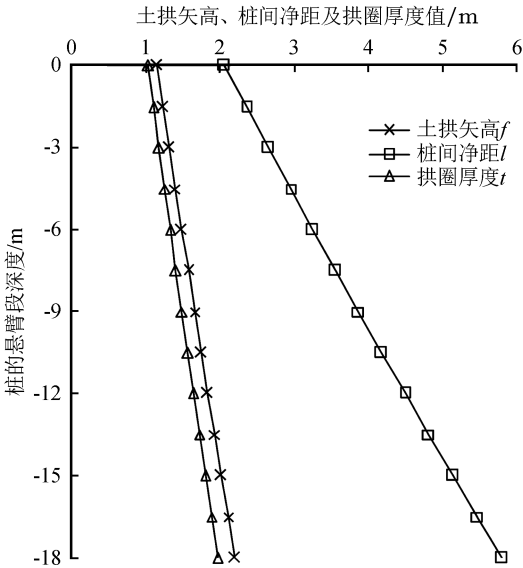


图 6 土拱矢高、桩间净距及拱圈厚度随桩悬臂段深度变化曲线
Fig.6 The curves of f, l', t with the depth of pile cantilever

大。拱圈厚度由 1.02 m 增大至 1.96 m,而桩身为拱脚时拱圈厚度为 1.01 m,两者基本相等;桩间净距由 2.06 m 增大至 5.8 m,此时桩间净距的最大值 5.8 m 与桩侧摩阻力为拱脚时的桩间净距(5.77 m)基本相等。由此看来,以桩侧摩阻力为拱脚时的桩间净距达到了其最大值。

5 桩间净距的影响因素分析

为进一步研究桩间净距的影响因素,针对滑坡推力、黏聚力、桩截面宽度及高度四个主要因素进行分析。采用文献[1]中桩身为拱脚的计算方法、文献[19]中桩侧摩阻力为拱脚的计算方法、本文提出的两者联合为拱脚的计算方法,基于这三种不同的受力特点进行分析和研究。

5.1 滑坡推力 p 的影响

桩间净距与滑坡推力的关系曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,随着滑坡推力的增大,桩间净距在三种不同的受力特点下均表现出逐步减小的趋势。桩侧摩阻力为拱脚时计算得到的桩间净距比其他两种计算方法大。两者联合为拱脚时得出的桩间净距在滑坡推力为 60~90 kPa 的范围内大于桩身为拱脚时的桩间净距,在滑坡推力 90~120 kPa 范围内小于以桩身为拱脚时计算的桩间净距。以桩身为拱脚时的桩间净距变化范围为 3.14~6.29 m,两者联合为拱脚时的桩间净距变化范围为 2.68~7.28 m,在滑坡推力为 60~120 kPa 下二者的变化范围较为接近。以桩侧摩阻力为拱脚时的桩间净距变化范围为 4.54~9.09 m,比其他两种方法计算结果的变化范围大。这是因为土拱跨中截面处的轴力最小而拱脚处的轴力最大,以桩侧摩阻力为拱脚时满足了跨中截面的塑性极限破坏,此时整个土拱均

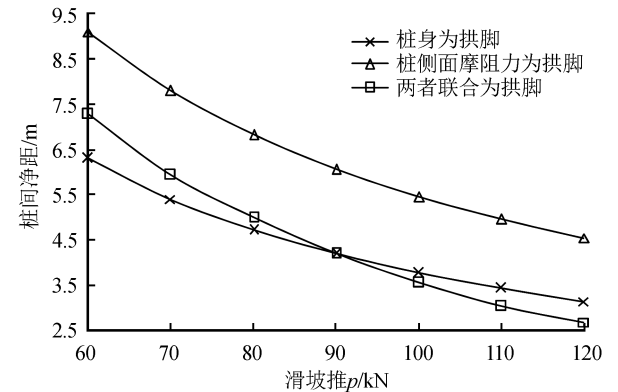


图 7 桩间净距与滑坡推力的关系曲线

Fig.7 Change curve of the net spacing between piles with landslide thrust

为塑性变形状态,因此计算得出的桩间净距为最大值,而其余两种方法采用的是拱脚极限平衡状态,其受力特征与实际较为相符,因此计算得到的桩间净距较为接近实际工程设计。

5.2 黏聚力 c 的影响

桩间净距与黏聚力的关系曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,随黏聚力的增大桩间净距均呈增大的趋势。这也符合实际受力状态,即滑坡土体的黏聚力越大,越容易形成土拱效应,进而使桩间净距增大。其中以桩侧摩阻力为拱脚时计算的桩间净距大于其他两种计算方法,其变化范围为 2.89~9.62 m。以桩身为拱脚和两者联合为拱脚计算的桩间净距在黏聚力 $c=65$ kPa 时相等,在黏聚力 $c<65$ kPa 时前者大于后者,当黏聚力 $c>65$ kPa 时前者小于后者。这是因为两者联合的计算方法在黏聚力较小时主要以桩身为拱脚受力,其桩间土滑移深度较大,而当黏聚力较大时主要以桩侧摩阻力为拱脚受力,桩间土滑移深度较浅,因此以桩侧摩阻力为拱脚的桩间净距比桩身为拱脚时大。

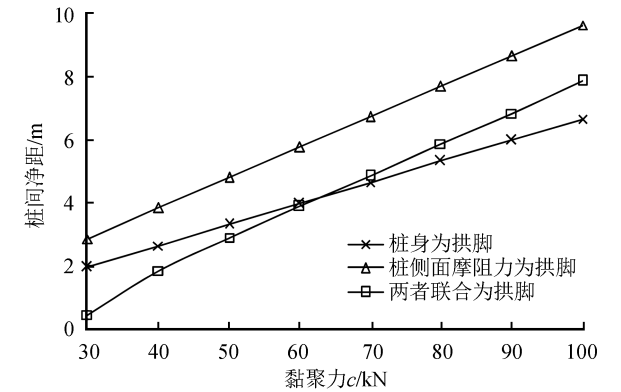


图 8 桩间净距与黏聚力的关系曲线

Fig.8 Change curve of the net spacing between piles with cohesion

5.3 桩截面宽度 b 的影响

桩间净距与桩截面宽度的关系曲线如图 9 所示。从图 9 中可以看出,以桩侧摩阻力为拱脚时的桩间净距不随桩截面宽度 b 的变化而变化,而是呈一条水平线,即为常量。这是因为以桩侧摩阻力为拱脚时桩截面宽度 b 不参与计算,桩间净距仅与桩截面高度有关。以桩身为拱脚和两者联合为拱脚时桩间净距随桩截面宽度的增大而增大,且二者数值极为接近。这是因为以桩侧摩阻力为拱脚的受力情形下桩截面宽度不参与计算,因此以两者联合为拱脚的方法在计算过程中仅考虑桩身为拱脚的受力情形。在文献[1]中假定拱脚分布在整個桩截面宽度

内,因此桩截面宽度越大,土拱的拱脚越大,土拱的拱圈也就越大,桩间净距也随之增大。

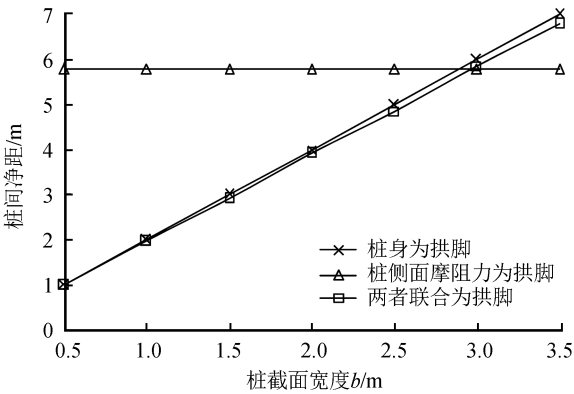


图 9 桩间净距与桩截面宽度 b 的关系曲线
Fig.9 Change curve of the net spacing between piles with the width of pile section

5.4 桩截面宽度 h 的影响

桩间净距与桩截面高度的关系曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出,以桩身为拱脚时桩间净距不随桩截面高度 h 的变化而变化,而是呈一条水平线,这是因为以桩身为拱脚时桩截面高度 h 不参与计算,桩间净距仅与桩截面宽度有关。以桩侧摩阻力为拱脚时桩间净距随桩截面高度 h 的增大而增大。以两者联合为拱脚时桩间净距在 $h=1\sim 2$ m 范围内随之增大,但当 h 超过 2 m 时桩间净距不随桩截面高度变化。这是因为计算过程中桩截面宽度为 2 m,当桩截面高度超过 2 m 后土拱的拱脚主要以桩身为支撑,桩侧摩阻力作为拱脚参与较少,同时表明桩间净距随桩截面高度的变化还与其宽度有关。

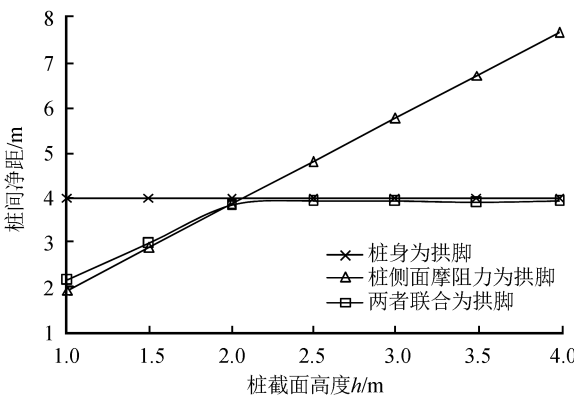


图 10 桩间净距与桩截面高度 h 的关系曲线
Fig.10 Change curve of the net spacing between piles with the height of pile section

6 结论

(1) 在以土拱效应确定抗滑桩桩间净距的过程

中,提出土拱拱脚由桩身和桩侧摩阻力两部分同时参与,改变了以往研究中将两者独立考虑的情形。

(2) 以桩侧摩阻力为拱脚时的破裂面推导出以桩身为拱脚时的破裂角计算公式,为计算考虑滑移深度的合理桩间距奠定了基础。

(3) 提出以考虑桩间土滑移深度来确定土拱的矢高以及土拱拱圈的厚度,在确定滑移深度过程中采用对数螺旋线法,从而使分析更加符合实际工程中桩间土坍塌情形。

(4) 在桩间净距的影响因素分析中,发现桩间净距随滑坡推力的增大而减小,随黏聚力的增大而增大。以桩侧摩阻力为拱脚计算时增加桩截面宽度不能改变桩间净距大小,而以桩身和两者联合为拱脚时桩间净距都随桩截面宽度的增加而增加。以桩侧摩阻力为拱脚时,桩间净距随桩截面高度的增加而增大;以桩身为拱脚时桩间净距为常量,不随桩截面高度变化;而以两者联合为拱脚时桩间净距不仅与桩截面高度变化有关,还与桩截面宽度有关。

在抗滑桩设计中桩间净距的计算主要以土拱效应为基础,但是现有研究主要采用平面应变,未考虑沿桩埋深的变化,因此今后的研究重点是通过理论分析、现场或室内试验以及数值分析研究土拱效应在空间的受力性能及分布形态。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 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):455-457,462.
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):455-457,462.

[3] 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.

[4] 李邵军,陈静,练操.边坡桩-土相互作用的土拱力学模型与桩间距问题[J].岩土力学,2010,31(5):1352-1358.
LI Shaojun,CHEN Jing,LIAN Cao.Mechanical Model of Soil Arch for Interaction of Piles and Slope and Problem of Pile

- Spacing[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(5):1352-1358.
- [5] 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.
- [6] 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):80-82.
- FENG Jun, LÜ Helin, WANG Chenghua. Application of M.M. PROMOTIYFAKONOV Theory to Solution of Distance between Anti-slide Piles[J].China Railway Science,2003,24(6):80-82.
- [7] 杨明,姚令侃,王广军.抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J].岩土工程学报,2007,29(10):1477-1482.
- YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guangjun. Study on Effect of Width and Space of Anti-slide Piles on Soil Arching between Piles[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(10):1477-1482.
- [8] 杨明,姚令侃,王广军.桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J].岩土力学,2008,29(3):817-822.
- YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guangjun. Study of Centrifuge Model Tests and Numerical Simulation on Soil Arching in Space of Piles[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29(3):817-822.
- [9] 王成,王东,陈夏雨,等.桩间土拱效应离心模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):33-36,98.
- WANG Cheng, WANG Dong, CHEN Xiayu, et al. Study on Centrifuge Model Tests of Soil Arching Effect between Piles[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2012,8(1):33-36,98.
- [10] 刘钦,李地元,刘志祥,等.水平推力作用下抗滑桩间土拱效应影响因素的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):2071-2077.
- LIU Qin, LI Di yuan, LIU Zhixiang, et al. Numerical Analysis of Influence Factors on Soil Arching Effect between Anti-sliding Piles under Horizontal Pushing Loads[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2011,42(7):2071-2077.
- [11] 陈福全,侯永峰,刘毓炅.考虑桩土侧移的被动桩中土拱效应数值分析[J].岩土力学,2007,28(7):1333-1337.
- CHEN Fuquan, HOU Yongfeng, LIU Yuchuan. Numerical Analysis of Soil Arching Effects in Displaced Passive Piles Considering Lateral Soil Movements[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(7):1333-1337.
- [12] 张建华,谢强,张照秀.抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2004,23(4):699-703.
- ZHANG Jianhua, XIE Qiang, ZHANG Zhaoxiu. Arching Effect of Anti-slide Pile Structure and Its Numerical Simulation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(4):699-703.
- [13] 姜春林,李晋.微型抗滑桩土拱效应空间特征的细观力学分析[J].岩土力学,2012,33(6):1754-1760,1815.
- JIANG Chunlin, LI Jin. Mesomechanical Analysis of Spatial Characteristics of Soil Arching Effect on Micro Anti-slide Pile System[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(6):1754-1760,1815.
- [14] 韩高孝,宫全美,周顺华.摩擦型岩土材料土拱效应微观机制颗粒流模拟分析[J].岩土力学,2013,34(6):1791-1798.
- HAN Gaoxiao, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua. Analysis of Microcosmic Mechanism of Soil Arching in Frictional Geotechnical Material by Particle Flow Simulating[J].Rock and Soil Mechanics,2013,34(6):1791-1798.
- [15] 韩同春,邱子义,豆红强.基于颗粒离散元的抗滑桩土拱效应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(8):2715-2722.
- HAN Tongchun, QIU Ziyi, DOU Hongqiang. Soil Arching Effect between Anti-slide Piles Based on YADE Discrete Element Method[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(8):2715-2722.
- [16] 张永兴,董捷,黄治云.合理间距条件悬臂式抗滑桩三维土拱效应试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1874-1881.
- ZHANG Yongxing, DONG Jie, HUANG Zhiyun. Experimental Investigation on Three-dimensional Soil Arching Effect between Adjacent Cantilever Anti-slide Piles with Rational Spacing[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(12):1874-1881.
- [17] KARL T. Theoretical Soil Mechanics[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [18] 李海光.新型支挡结构设计 with 工程实例(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [19] 杨雪强,吉小明,张新涛.抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J].中国公路学报,2014,27(1):30-37.
- YANG Xueqiang, JI Xiaoming, ZHANG Xintao. Analysis of Soil Arching Effect between Anti-slide Piles and Different Arch Body Modes[J].China Journal of Highway and Transport,2014,27(1):30-37.
- [20] 甘肃省舟曲县锁儿头滑坡防治工程施工图设计[Z].甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院,2013.