

基于土拱效应的抗滑桩临界桩间距影响因素研究

艾章婵^{1,2}, 窦俊³, 周云东^{1,2}, 樊胜兴⁴

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 南京诚明建设咨询有限公司, 江苏 南京 210000;

4. 湖南对外建设有限公司 南京分公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 合理设置抗滑桩桩间距对确保滑坡稳定具有重要作用。针对土拱理论在抗滑工程中的应用, 对抗滑桩工程中土拱效应的影响因素进行了较为详细的介绍, 讨论了各影响因素对抗滑桩临界桩间距的影响, 并以工程实例说明了各种算法的差异, 对于抗滑桩工程的设计和施工具有一定的指导意义。

关键词: 土拱效应; 抗滑桩; 临界桩间距; 影响因素

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)05—0143—04

Advances on Research about Influencing Factors of Critical Spacing between Anti-slide Piles Based on Soil Arching Effect

AI Zhang-chan^{1,2}, DOU Jun³, ZHOU Yun-dong^{1,2}, FAN Sheng-xing⁴

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Nanjing Chengming Construction Consulting Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000, China;

4. Nanjing Branch Office of Hu'nan Foreign Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210000, China)

Abstract: The reasonable anti-slide pile's spacing setting would play an important role in economy to ensure slope stability. According to the application of soil arch theory in anti-slide projects, the influencing factors for soil arching effect in anti-slide pile engineerings are introduced in detail, and the effects of the influence factors on the critical spacing between anti-slide piles are also discussed. Then, the differences of various calculation algorithms are illustrated by practical projects, which could provide a guiding significance for the design and construction in anti-slide pile engineerings.

Keywords: soil arching effect; anti-slide pile; critical pile spacing; influence factor

边坡滑塌失稳是较常见的灾害形式, 常会造成灾难性的后果^[1]。如 2012 年 2 月 7 日甘肃永靖县盐锅峡镇黑台台缘焦家崖根段突发山体滑坡地质灾害事故, 滑坡土方量约 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$, 滑坡造成通往盐锅峡镇的主干道路盐北路完全中断, 严重影响到人民的生活及生产安全。如何有效防治滑坡灾害, 成为岩土工程界普遍关注的重要课题。抗滑桩由于桩身截面大, 抗滑能力强, 用抗滑桩加固边坡成为其中的一种重要治理措施。当抗滑桩开始发生作用时, 由于抗滑桩的横向位移小于坡体的横向位移, 造成桩后一定范围内土体将产生不同的位移: 在设桩处位移较小, 两桩位移较大。由于位移的不均匀性, 致

使土颗粒受到压缩, 并互相“楔紧”, 在一定范围的土层中形成土拱。

土拱效应在土力学领域有着广泛的应用, 自 1943 年 Terzaghi 通过著名的活动门试验证实了土力学领域土拱效应的存在^[2], 许多岩土工程领域的专家学者就对此给予了充分的关注。在试验研究方面, 已有学者^[3-7]采用数值分析方法对土拱效应进行了分析。杨明^[8-9]通过离心试验模型和采用数值模拟方法定性的分析了桩间土拱与桩宽度、桩间距的关系。韩爱民^[10]采用平面有限元分析, 研究表明泊松比小、剪胀角大、强度高、桩土接触面粗糙的土体易形成土拱。基于土拱效应的抗滑桩临界桩间距

的研究越来越多,建立的计算模型不同,所取参数也存在巨大的争议。贾海莉^[11]基于土体的极限平衡条件对滑坡推力作用下土体中的成拱作用进行研究,得出了抗滑桩的最大桩间距公式,讨论了桩间净距与滑坡推力、抗滑桩直径、土体粘聚力和内摩擦角之间的关系。王乾坤^[12]提出以桩间土体的摩尔库伦破坏准则、土体的力学平衡和桩间土体的绕流阻力计算共同控制来确定临界桩间距的方法,由控制条件得出临界桩间距随桩后土体的粘聚力和内摩擦角的增大而增大,随滑坡推力的增大而减小。

本文基于土拱效应在抗滑桩工程中的研究和应用,结合前人对于桩间土拱效应的研究成果,分析了土拱效应影响因素对抗滑桩临界桩间距的影响。

1 考虑土拱效应的抗滑桩临界桩间距探讨

桩间距作为抗滑桩设计的重要指标,桩间距过大时不能起到抵挡滑坡推力的作用,桩间距过小又易造成材料的浪费和施工的困难,因此确定抗滑桩的临界桩间距具有十分重要的意义。下列各式中 c 为土体的粘聚力, φ 为内摩擦角, a 为桩宽, b 为桩高(侧面宽), h 为土拱处滑面至坡顶的距离, P 为滑坡推力, q 为桩后单位厚度坡体线分布力($P = q \times h$), γ 为滑体的重度, S 为桩间净距。

1.1 王成华算法^[13]

王成华假定滑坡推力过程中无能量损耗且全部滑动推力由侧摩阻力承担。从方桩桩间土拱的形成机理和受力特征等方面探讨了土拱的受力变形、力的传递路径和考虑土拱变形破坏的最大桩间距,并建立了最大桩间距估算模型。不足之处在于未考虑土拱的强度条件。

$$S = \frac{2cbh}{P(1 - \tan\varphi)} \quad (1)$$

1.2 李长东算法^[14]

李长东等人在王成华^[13]的基础上考虑桩高对桩间距的影响,且考虑了桩后土拱的强度条件。修正了基于土拱效应的抗滑桩最大桩间距计算模型,认为最大桩间净距 S 为:

$$S = \frac{2bc(h-1)}{P(1 - \tan\varphi) - \gamma h \tan\varphi} \quad (2)$$

1.3 周德培算法^[15]

周德培假定:(1) 拱形为抛物线;(2) 将土拱问题简化为桩长方向的平面应变问题;(3) 桩后土压力均匀分布作用于土拱上。但实际上土拱效应沿桩

长不是均匀分布的,(2) 假定情况夸大了土拱效应。提出以静力平衡条件、跨中界面强度条件及拱脚处界面强度条件共同控制桩间距的确定。得出了桩间净距的计算式:

$$S = \frac{ca(1 + \sin\varphi)}{q\cos\alpha(1 - \sin\varphi)} \quad (3)$$

其中 α 为三角形界面与水平方向的夹角。

1.4 赵明华算法^[16]

赵明华假定拱轴线为抛物线,且拱轴线起点切线的倾角 $\beta = 45^\circ + \varphi/2$,考虑强度条件和土拱的静力平衡,假定桩为方桩,得出了桩间净距的一个计算公式:

$$\text{强度条件: } S \leq 4bc \frac{\sin\beta\cos\varphi}{q(1 - \sin\varphi)} \quad (4)$$

$$\text{土拱的净力平衡: } S \leq \frac{2bc\tan(45^\circ + \varphi/2)}{q[\tan(45^\circ + \varphi/2) - \tan\varphi]} \quad (5)$$

不足之处在于模型本身简单,且土体参数的差异很大。假设土拱拱脚处起始切向角的依据不足,且认为最不利截面位置为跨中与工程实际不吻合。

1.5 叶代成算法^[17]

叶代成根据桩间土体的侧摩阻力的变化和相对变形引起的位移差,提出了用等效抗滑桩模型代替实际抗滑桩的想法,根据桩间土拱的受力特征认为有效土拱的最前端是楔紧作用最显著的土拱单元,在这个分析的基础上认为桩间土拱的拱形为抛物线性,满足了平衡条件和强度条件,不足之处在于假定土拱沿桩长均匀分布,而实际土拱沿桩长是逐渐减小的,在一定程度上夸大了土拱效应。

$$\text{其桩间净距为: } S = \frac{2a[P + 2chtan(45^\circ - \varphi/2)]}{Ptan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (6)$$

2 工程实例对比

目前抗滑桩中的土拱效应研究数量已经相当可观。在研究抗滑桩中的土拱效应时,由于影响因素的多样性和复杂性,以及它们与土拱效应之间的非线性和非确定关系,使得临界桩间距的解析式还不能反映其复杂多变的机理,因此很有必要研究这些因素对临界桩间距的影响效果。

根据文献^[16]的工程实例,紫阳滑坡位于陕西省紫阳县城汉江北岸的一级阶地上,滑坡体主要组成物质有全新系堆积物,以粘土和亚粘土为主,间杂有碎石,下伏基岩为千枚岩。经勘测表明,滑坡体上缘的四系堆积物中已形成滑动面,而滑坡体下部将

沿基岩面滑动。据室内试验得到滑坡体的粘聚力 c 为 60 kPa,内摩擦角 φ 为 24° ,桩宽 a 为 2 m,桩高 b 为 3 m,抗滑段受荷长 h 为 10.5 m,滑坡推力 P 为 1 040.5 kN/m, $q = P \div h = 1040.5 \div 10.5 = 99.1$

kN/m,滑体的重度 γ 为 20 kN/m³。
各种临界桩间距公式所需参数不同,得出的桩间净距值也存在很大差别,详见表 1。

表 1 各种算法计算结果对比

方法	桩间净距公式	所需土体参数	桩间净距值 /m
1. 王成华算法	$S = \frac{2cbh}{P(1 - \tan\varphi)}$	c, b, P, h, φ	6.55
2. 李长东算法	$S = \frac{2bc(h - 1)}{P(1 - \tan\varphi) - \gamma h \tan\varphi}$	$c, b, P, h, \varphi, \gamma$	7.07
3. 周德培算法	$S = \frac{ca(1 + \sin\varphi)}{q\cos\alpha(1 - \sin\varphi)}$	c, a, q, φ	3.21
4. 赵明华算法	$S \leq \frac{4bc}{q} \frac{\sin\beta\cos\varphi}{(1 - \sin\varphi)}$ $S \leq \frac{2bctan(45^{\circ} + \varphi/2)}{q[\tan(45^{\circ} + \varphi/2) - \tan\varphi]}$	c, b, q, φ	5.11
5. 叶代成算法	$S = \frac{2a[P + 2chtan(45^{\circ} - \varphi/2)]}{Ptan(45^{\circ} - \varphi/2)}$	c, a, P, h, φ	11.00

2.1 S 与 P 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,算法 1 中 S 与 P 成反比关系;算法 2 中 S 随 P 的增大而非线性的减小;算法 3 和算法 4 中 S 与 q 成反比关系;算法 5 中 S 随 P 的增大而非线性的减小。

2.2 S 与 c 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,算法 1 ~ 5 中 S 与 c 成正比关系。

2.3 S 与 φ 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,5 种算法中 S 与 φ 的关系较为复杂,算法 1、2、3 和算法 5 中 S 与 φ 呈增函数关系;算法 4 中 S 与 φ 呈非确定关系。

2.4 S 与 a 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,算法 3 和算法 5 中 S 与 a 呈正比关系。

2.5 S 与 b 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,算法 1、算法 2 和算法 4 中 S 与 b 呈正比关系。

2.6 S 与 γ 的关系

由表 1 可知,当其他量不变时,只有算法 1 考虑了 S 与 γ 的关系, S 随 γ 的增大而增大。

综上,算法 3、算法 4 都假设滑坡推力沿桩长均匀分布,与实际存在误差,在一定程度上夸大了土拱效应。算法 1、算法 2、算法 4 以桩间土拱效应为基础分析临界桩间距,所得 S 与 b 呈正比关系,与 a 无关;算法 3 和算法 5 以桩后土拱效应为基础分析临界桩间距,所得 S 与 a 呈正比关系,与 b 无关。

通过工程实例数据的对比分析,所得桩间净距值相差甚大。在上述 5 种算法中,笔者认为算法 3 和算法 4 更加科学、可靠,接近于实际情况,应结合二者计算模型综合考虑。上述临界桩间距的模型都是建立在一定假定基础上,各个假定情况与实际存在偏差,临界桩间距公式只反映了临界桩间距与部分参数的关系,各计算公式尚存不足,都存在一定的局限性。抗滑桩与滑坡体相互作用是一个复杂的过程,考虑土拱效应的理论分析方面,目前有两种不同的观念:(1)以桩后土拱效应传递荷载分析临界桩间距,忽略桩间土拱效应;(2)以桩间土拱效应传递荷载分析临界桩间距,而忽略桩后土拱效应。笔者认为桩土相互作用具有阶段性特征,应综合考虑桩后土拱效应和桩间土拱效应,从而得出临界桩间距值。

3 结 语

正确认识各参数对土拱效应的影响是确定临界桩间距的基础,本文结合目前土拱效应影响因素的研究现状,在此基础上分析了土拱效应的影响因素对抗滑工程临界桩间距的影响,并指出了进一步的研究方向:

- (1) 土拱效应的影响因素还与土体参数(剪胀角、弹性模量、粒径、含水率、密度、空隙比等)、拱脚的结构及土压力的确定有关,因此仍需要在大量试验或数值模拟的基础上进一步研究探讨。
- (2) 目前的研究尚未考虑滑坡推力沿桩长的不均匀分布。

(3) 桩土相互作用具有阶段性的特征,应综合考虑桩后土拱效应和桩间土拱效应,从而得出临界桩间距值。

(4) 各临界桩间距计算式具有一定的局限性,在工程实际应用中应结合其他因素综合考虑。

参考文献:

- [1] 易顺民,晏同珍.滑坡时空结构的分析特征及其意义[C]//滑坡文集(第十三集).北京:中国铁道出版社,1998:33-37.
- [2] Terzaghi K. Theoretical Soilmechanics[M]. New Youk: John Wiley & Sons, 1943.
- [3] 姚元锋,赵晓彦.抗滑桩桩间土拱效应试验方法的研究[J].路基工程,2010,(2):86-88.
- [4] 吕庆,孙红月,尚岳全.抗滑桩桩后土拱效应的作用机理及发育规律[J].水利学报,2010,41(4):471-476.
- [5] 吕庆,孙红月,尚岳全.抗滑桩桩后土拱形状及影响因素[J].哈尔滨工业大学学报,2010,42(4):629-633.
- [6] 胡焕校,刘静,吴海涛,等.抗滑桩桩后土拱效应特征的三维数值研究[J].工业建筑,2010,40(3):88-93.
- [7] 熊良宵,李天斌.土拱效应在抗滑桩工程中的应用[J].防灾减灾工程学报,2005,25(3):275-277.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 韩爱民,肖军华,梅国雄.被动桩中土拱效应特征与影响参数研究[J].工程地质学报,2006,14(1):111-116.
- [11] 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.
- [12] 王乾坤.抗滑桩的桩间土拱和临界间距的探讨[J].武汉理工大学学报,2005,27(8):64-67.
- [13] 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,2001,19(6):556-559.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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):1-4.
- [17] 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.

