

基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力分析

刘 鹏¹, 马显春², 胡正涛³, 董晓宏¹, 翟小平¹

(1. 四川省冶勘设计集团有限公司, 四川 成都 610051;

2. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610031;

3. 四川省冶金地质勘查局水文工程大队, 四川 成都 611730)

摘 要: 抗滑桩设计推力的计算是滑坡治理工程的关键, 决定了治理工程的成败。在分析抗滑桩桩间土拱效应形成机理的基础上, 推导了考虑桩间土拱效应的抗滑桩设计推力计算公式, 并与常规设桩处的剩余推力进行对比, 分析了滑面倾角、桩截面尺寸和桩间距对抗滑桩设计推力的影响。结果表明: 随着滑面倾角的增大, 设计推力曲线先为水平线, 而后呈对称的抛物线形, 而且存在使设计推力为 0 和最大值的滑面倾角; 抗滑桩的设计推力随着桩高度的增大以直线形式单调减小, 随着桩宽度的增大以抛物线形式单调增加, 随着桩间距的增大而单调减小。最后, 通过工程实例验证了基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力计算方法的合理性。

关键词: 桩间土拱效应; 抗滑桩; 设计推力; 剩余下滑力; 桩侧摩阻力

中图分类号: U213.1+52.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)05-0102-07

Design Thrust Analysis of Anti-slide Pile Based on Soil Arch Effect Between Piles

LIU Peng¹, MA Xianchun², HU Zhengtao³, DONG Xiaohong¹, ZHAI Xiaoping¹

(1. Sichuan Metallurgical Geological Survey and Design Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China;

2. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Hydro-engineering Team of Sichuan Metallurgical Geology & Exploration Bureau, Chengdu, Sichuan 611730, China)

Abstract: The calculation of design thrust force of anti-slide pile is the key to landslide control engineering and determines the success or failure of landslide control engineering. On the basis of analyzing the formation mechanism of soil arch effect between piles, the calculation formula of design thrust force of anti-slide pile considering soil arch effect between piles is deduced, and compared with the residual thrust force of conventional pile, the influence of dip angle of sliding surface, pile section size and pile spacing on design thrust force of anti-slide pile is analyzed. The results show that with the increase of the dip angle of the sliding surface, the designed thrust curve is first horizontal and then symmetrical parabolic, and there is a dip angle of the sliding surface that makes the designed thrust be zero and the maximum. The design thrust of anti-slide pile decreases monotonously with the increase of pile height, increases monotonously with the increase of pile width in the form of parabola, and decreases monotonously with the increase of pile spacing. Finally, the rationality of design thrust calculation method of anti-slide pile based on soil arch effect between piles is verified by an engineering example.

Keywords: soil arch effect between piles; anti-slide pile; design thrust; surplus sliding force; piles lateral friction

收稿日期: 2022-06-14

修稿日期: 2022-07-17

基金项目: 科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2015-KJ031-Z031-02); 四川省科技计划资助项目(2021ZHCG0014)

作者简介: 刘 鹏(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治、岩土工程和工程地质勘察、设计、施工、安全生产技术及相关领域的研究工作。E-mail: liup004@qq.com

通讯作者: 马显春(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事边坡工程与地质灾害防治方面的科研与咨询工作。E-mail: maxianchun1980@163.com

抗滑桩是滑坡防治的一种工程构筑物。我国抗滑桩技术是六十年代在铁路建设实践中采用和发展起来的,几十年来得到了迅速发展和推广应用^[1-4]。

从抗滑支挡工程结构与被加固滑坡体的相对力学关系出发,国内外目前常用的滑坡推力计算方法可以概括为极限平衡法和数值分析法两大类。极限平衡法可分为 Fellenius(1936)法^[5], Bishop(1955)法^[6],传递系数(1960)法^[7], Janbu(1973)法(J法)^[8], Morgenstern 和 Price(1965)法(M-P法)^[9], Spencer(1967)法(S法)^[10], Sarma(1973)^[11]法等。极限平衡法以条分法为基础,假定土体是理想塑性材料,把土条视为刚体,按极限平衡的原则进行力的分析。极限平衡法原理简单、计算简便、易于理解,在长期的工程实践中得以大力发展和应用。张天宝^[12]通过对 Fellenius 法稳定安全系数函数的数值分析,较全面地归纳了最危险滑弧位置的变化规律。70年代末,王复来^[13]对 Janbu 法作了一些改进,使得 Janbu 法使用起来更方便。80年代,我国水利水电科学研究院的陈祖煜在 Morgenstern 指导下对 M-P 法作了改进,后来他又全面地阐述了 Morgenstern-Chen 法的基本方程、边界条件、合理性条件和解题方法^[14-16]。我国铁道部科学研究院西北分院的徐邦栋提出的传递系数法^[7,17-18]由于其计算模型简单、计算方法简便、计算结果能满足工程要求而备受工程界的青睐,广泛应用于我国水利、交通和铁道部门的滑坡稳定性分析中,先后被列入《工业与民用建筑工程地质勘察规范》^[19](TJ21—77)、《滑坡防治工程勘查规范》^[20](DZ/T 0218—2006)、《岩土工程勘察规范》^[21](GB 50021—2001)等多部行业规范。数值分析法可分为有限单元法、边界单元法、离散单元法、块体理论法、无界元法、不连续变形分析法与耦合算法等。由此可见,滑坡推力的定量分析方法基本上形成了比较完整的理论体系。

现行滑坡治理工程设计过程中,首先计算滑坡的稳定系数,在给定安全系数的基础上,进而计算滑坡推力,根据计算结果及地形条件选择拟设桩位置,同时确定设计推力。如果拟设桩前滑体是稳定的(下滑力<抗滑力),拟设桩处的剩余下滑力减去桩前滑体抗力与被动土压力之小值即为设计推力;如果拟设桩前滑体是不稳定的(下滑力>抗滑力),拟设桩处的剩余下滑力即为设计推力。

这种设计方法通常是假定每根桩所承受的滑坡

推力等于一个桩间距(中至中)范围内的滑坡推力,也即是抗滑桩的设计推力。但是该设计方法没有考虑土拱效应,也不能反应桩身设计参数(桩截面尺寸、桩间距)的变化对抗滑桩设计推力的影响。虽然目前采用上述方法治理滑坡的成功案例很多,但是均过于保守、安全储备太大,导致治理资金浪费严重。

从抗滑桩的受力形式来看,抗滑桩主要承受水平荷载(桩后滑坡体剩余下滑力的水平分力),但从现场监测结果来看,抗滑桩实际承受的水平荷载值远小于其设计值,甚至不足设计值的20%^[22-24]。戴自航等^[22]通过原位测试,对抗滑桩施加水平分布荷载,实测带护壁抗滑桩的内力和变形,结果表明抗滑桩的最大正弯矩均比设计值小50%以上,并指出其原因可能是目前工程设计中没有考虑护壁的作用。罗丽娟等^[25]通过室内物理模型试验研究了人工挖孔抗滑桩护壁对桩身结构水平承载能力的贡献,建议实际工程中考虑抗滑桩护壁的贡献度应不超过20%。由此可见,抗滑桩的护壁结构分担了其一部分水平荷载,还有其它结构也分担了其一部分水平荷载,即“桩间土拱”。

因此,从桩间土拱效应出发,进一步研究抗滑桩的设计推力,以期提高抗滑桩的治理效果,节约工程投资,增加滑坡治理工程的可靠度。

1 抗滑桩桩间土拱效应的形成机理

抗滑桩截面较大、间距较近、嵌入稳定地层,其抗滑机理在于桩身、滑体、滑床三者之间相互协调的工作过程。当桩后滑体的剩余推力作用在桩身上时,滑床提供嵌固段桩前抗力或相互间摩阻力,使抗滑桩的刚性侧移受阻,这时抗滑桩与滑体间出现了相对位移的趋势,桩后滑体的运动受阻,并不断压缩,出现了与下滑方向近一致的不均衡抗滑阻力,进而引起桩后滑体向桩间侧移,在一定条件下滑体土颗粒在桩间便产生“楔紧”作用,从而使桩间土体出现土拱效应^[26]。

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,对抗滑桩及桩后滑体的稳定是有利的,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)。因而在设计抗滑桩时应尽可能使桩间产生土拱效应,发挥土拱对桩间土体的稳固作用。

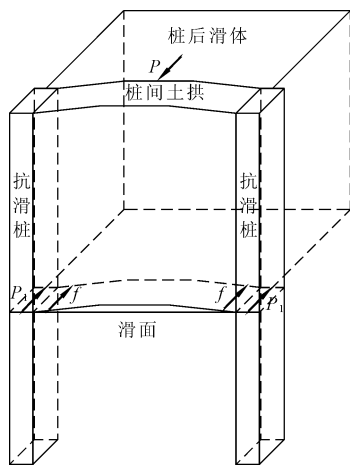


图 1 桩间土拱受力模型

2 基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力计算

为避免混淆,首先对拟设抗滑桩处的剩余推力和抗滑桩的设计推力进行概念的澄清。拟设抗滑桩处的剩余推力是拟设桩位以上的滑体下滑力与抗滑力之差值。根据传递系数法原理,抗滑桩的设计推力是在给定安全系数 K_s 的情况下(也即是将下滑力增大 K_s 倍),桩身所直接承担的滑坡剩余推力,其值远小于设桩处的剩余推力。

首先作如下假定条件:

(1) 抗滑桩与滑体间产生相对位移或有相对位移趋势。

(2) 抗滑桩具有足够的强度和刚度,能够承受滑坡推力,且桩间距布置合理,相邻两抗滑桩侧摩阻力之和不小于桩间滑坡推力。

(3) 桩间土拱的变形达到或接近临界变形。

(4) 滑坡剩余下滑力在传递过程中无能量损耗,并以正压力方式全部转化为桩侧摩阻力。

(5) 不考虑桩间土拱的自重、下滑力与抗滑力及土拱前的被动土压力。

桩间土拱在受到滑坡剩余下滑力作用后变形逐渐增大,当桩间土拱的变形达到或接近临界变形时,桩间(中至中)滑体的剩余下滑力由桩身作用在滑体上的水平支撑力和桩侧摩阻力(桩间土拱传递到桩身侧面的摩阻力)共同分担^[27]。也就是说,桩侧摩阻力承担了桩间净距范围内的全部滑坡推力。

选定桩后第 i 块滑体为计算模型,不考虑桩间土拱的下滑力与抗滑力,其受力如图2所示,于是由平面力系极限平衡条件可得:

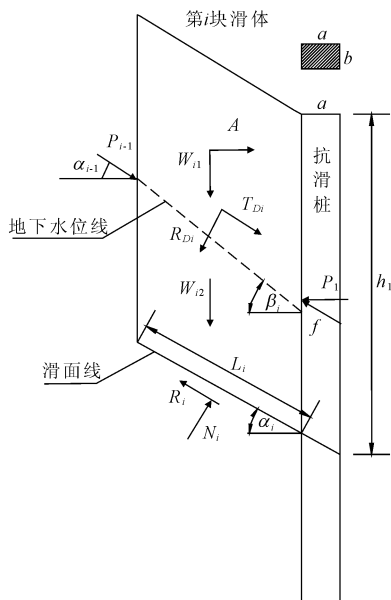


图 2 条块受力分析图

$$P_{i-1}\varphi_{i-1} + K_s[(W_{i1} + W_{i2})A\cos\alpha_i + W_{i1}\sin\alpha_i + T_{Di} + W_{i2}\sin\alpha_i] - R_i - f/b - P_1\cos\alpha_i/b = 0 \quad (1)$$

$$-(W_{i1} + W_{i2})A\sin\alpha_i + W_{i1}\cos\alpha_i + R_{Di} + W_{i2}\cos\alpha_i - N_i + P_1\sin\alpha_i/b = 0 \quad (2)$$

其中:

$$R_i = C_i L_i + N_i \tan\phi_i \quad (3)$$

$$f = C_i a h_i + (P_1 B / 2b) \tan\phi_i \quad (4)$$

$$\varphi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan\phi_i \quad (5)$$

$$T_{Di} = \gamma_w h_{iw} L_i \cos\alpha_i \sin\beta_i \cos(\beta_i - \alpha_i) \quad (6)$$

$$R_{Di} = \gamma_w h_{iw} L_i \cos\alpha_i \sin\beta_i \sin(\beta_i - \alpha_i) \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 条块的剩余下滑力,kN/m; φ_{i-1} 为第 $i-1$ 块的剩余下滑力传递至第 i 块时的传递系数; W_i 为第 i 条块的重量,kN/m; C_i 为第 i 条块内聚力,kPa; ϕ_i 、 ϕ_{i-1} 为第 i 条块、第 $i-1$ 条块内摩擦角, $^\circ$; L_i 为第 i 条块滑面长度,m; α_i 、 α_{i-1} 为第 i 条块、 $i-1$ 条块滑面倾角, $^\circ$; β_i 为第 i 条块地下水流向, $^\circ$; A 为地震加速度, g ; K_s 为安全系数; T_{Di} 为水压力的下滑分力,kN/m; R_{Di} 为水压力的抗滑分力,kN/m; f 为桩侧摩阻力,kN; P_1 为桩身作用在滑体上的水平支撑力,与滑体作用在桩身的剩余推力大小相等方向相反,kN; a 为抗滑桩的高度,m; b 为抗滑桩的宽度,m; h_i 为第 i 条块滑体厚度,即第 i 条块滑面以上抗滑桩的高度,m; B 为抗滑桩的净间距,m。

把式(2)、式(3)、式(4)代入式(1),可得:

$$P_1 = \frac{P_{i-1}\varphi_{i-1} + A(W_{i1} + W_{i2})(K_s \cos\alpha_i + \sin\alpha_i \tan\phi_i)}{\sin\alpha_i \tan\phi_i / b + B \tan\phi_i / 2b^2 + \cos\alpha_i / b} + \frac{(W_{i1} + W_{i2})(K_s \sin\alpha_i - \cos\alpha_i \tan\phi_i)}{\sin\alpha_i \tan\phi_i / b + B \tan\phi_i / 2b^2 + \cos\alpha_i / b} +$$

$$\frac{K_s T_{Di} - R_{Di} \tan \phi_i - C_i (L_i + ah_i/b)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i / b + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i / b} \quad (8)$$

则抗滑桩的设计推力 P 为:

$$P = \frac{P_1}{b} = \frac{P_{i-1} \varphi_{i-1}}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} + \frac{A(W_{i1} + W_{i2})(K_s \cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \phi_i)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} + \frac{(W_{i1} + W_{i2})(K_s \sin \alpha_i - \cos \alpha_i \tan \phi_i)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} + \frac{K_s T_{Di} - R_{Di} \tan \phi_i - C_i (L_i + ah_i/b)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} \quad (9)$$

在不考虑地震力和地下水的作用时,式(9)可简化为:

$$P = \frac{P_{i-1} \varphi_{i-1}}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} + \frac{W_i (K_s \sin \alpha_i - \cos \alpha_i \tan \phi_i)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} + \frac{C_i (L_i + ah_i/b)}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} \quad (10)$$

对于具体的滑坡工程,在滑带参数及条块划分确定后,抗滑桩的设计推力只与桩的截面宽度、高度及桩间距有关。首先根据第 $i-1$ 条块的剩余下滑力初步拟定抗滑桩的截面宽度、高度及桩间距,利用式(9)或式(10)计算抗滑桩的设计推力,进而计算抗滑桩的内力、弯矩及配筋,如果计算合理,此时的抗滑桩的截面宽度、高度及桩间距即为桩身设计参数;如不合理,利用式(9)或式(10)计算的抗滑桩设计推力,重新拟定抗滑桩的宽度、高度及桩间距,计算抗滑桩的内力、弯矩及配筋,如此反复,直到得出最经济合理的抗滑桩设计参数。抗滑桩设计推力确定见图3。

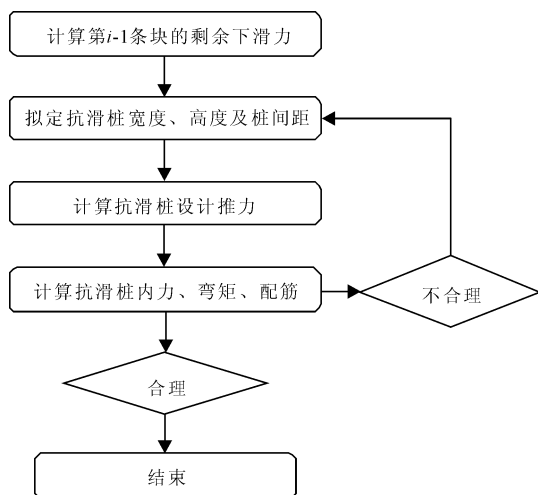


图3 抗滑桩设计推力流程图

3 抗滑桩设计推力 P 与设桩处滑坡剩余推力 P_i 的关系分析

由图2第 i 条块的受力分析图,可推导出设桩处滑坡剩余推力 P_i 的计算公式如下:

$$P_i = P_{i-1} \varphi_{i-1} + A(W_{i1} + W_{i2})(K_s \cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \phi_i) + (W_{i1} + W_{i2})(K_s \sin \alpha_i - \cos \alpha_i \tan \phi_i) + K_s T_{Di} - R_{Di} \tan \phi_i - C_i L_i \quad (11)$$

在不考虑地震力和地下水的作用时,式(11)可简化为:

$$P_i = P_{i-1} \varphi_{i-1} + W_i (K_s \sin \alpha_i - \cos \alpha_i \tan \phi_i) - C_i L_i \quad (12)$$

由式(9)和式(11)或由式(10)和式(12),均可得到抗滑桩的设计推力 P 与设桩处剩余推力 P_i 的关系式如下:

$$P = \frac{P_i - C_i ah_i/b}{\sin \alpha_i \tan \phi_i + B \tan \phi_i / 2b + \cos \alpha_i} \quad (13)$$

下面结合具体的工程实例来说明抗滑桩的设计推力 P 与设桩处剩余推力 P_i 的关系。

滑坡治理工程中,抗滑桩截面尺寸高度 $a = 3$ m,宽度 $b = 2$ m,桩长 30 m,其中嵌固段长度 10 m(从桩靠坡侧滑面起算),桩心水平距离(中至中)为 6 m。拟设工程位置其它参数如下: $C_i = 21$ kPa; $\phi_i = 24.5^\circ$, $\alpha_i = 30^\circ$, $h_i = 20$ m, $B = 4$ m。

将以上参数代入式(13),可得:

$$P = \frac{P_i - 630}{1.55} \quad (14)$$

$$\text{设 } K = \frac{P}{P_i} (K \geq 0) \quad (15)$$

把式(15)代入式(14),可得:

$$(1 - 1.55K)P_i = 630 \quad (16)$$

由 $1 - 1.55K \geq 0$,可得 $K \leq 0.6452$,即:

$$P \leq 0.6452P_i \quad (17)$$

抗滑桩的设计推力 P 与设桩处剩余推力 P_i 的关系见表1。

由表1并结合上述分析,可以看出,抗滑桩的设计推力最大值也即是设桩处剩余推力计算值的60%左右。实际滑坡治理工程设计中,单根抗滑桩的设计推力通常不超过 3 000 kN/m,因此,抗滑桩的设计推力通常不超过设桩处剩余推力计算值的50%。

戴自航等^[19]通过原位测试,对抗滑桩施加水平分布荷载,实测带护壁抗滑桩的内力和变形,结果表明抗滑桩的最大正弯矩均比设计值小 50% 以上,这

一点也证实了本文提出的基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力计算方法的正确性。

表 1 抗滑桩设计推力 P 与剩余推力 P_i 的关系表		
设计推力 $P_i/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	剩余推力 $P/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	比例系数 K
1000	238.71	0.2387
1500	561.29	0.3742
2000	883.87	0.4419
2500	1206.45	0.4826
3000	1529.03	0.5097
3500	1851.61	0.5290
4000	2174.19	0.5435
4500	2496.77	0.5548
5000	2819.35	0.5639
5500	3141.94	0.5713
6000	3464.52	0.5774
6500	3787.10	0.5826
7000	4109.68	0.5871
7500	4432.26	0.5910
8000	4754.84	0.5944

4 抗滑桩设计推力的影响因素分析

4.1 滑面倾角对抗滑桩设计推力的影响分析

为简化计算且能阐明问题所在,本节利用不考虑地震力和地下水作用时,抗滑桩设计推力的简化计算式(10)来阐述此问题。

在分析滑面倾角的变化对抗滑桩设计推力的影响时,设定第 $i-1$ 条块的剩余下滑力 P_{i-1} 、滑面倾角 α_{i-1} 、滑体厚度 h_{i-1} 和第 i 条块的滑面长度 L_i 、滑体厚度 h_i 不变,仅变化第 i 条块的滑面倾角 α_i 。仍结合上节的工程实例来说明。拟设工程位置参数如下: $\gamma = 22 \text{ kN/m}$, $C_i = 21 \text{ kPa}$, $L_i = 23 \text{ m}$, $\phi_i = 24.5^\circ$, $\alpha_{i-1} = 30^\circ$, $a = 3 \text{ m}$, $b = 2 \text{ m}$, $h_i = h_{i-1} = 20 \text{ m}$, $B = 4 \text{ m}$, $K_s = 1.1$ 。

将上述参数代入式(10),得到抗滑桩的设计推力 P 与滑面倾角 α_i 的关系见图 4。

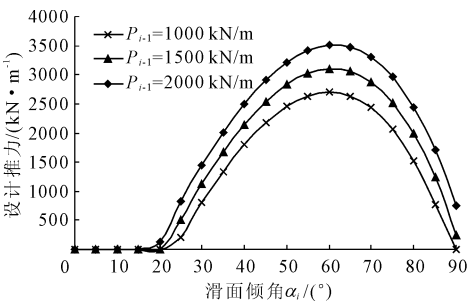


图 4 抗滑桩设计推力 P 与滑面倾角 α_i 的关系图

由图 4 可以看出,设桩处的滑面倾角由 $0^\circ \sim 90^\circ$ 逐渐增大时,三条设计推力曲线的趋势相同,都是先为水平段,然后上凸,达到最大值后下凹,为抛物线形式。定义“设计推力曲线由水平段过渡到上凸段的滑面倾角”为“设计推力起始角”,“设计推力曲线达到最大值的滑面倾角”为“设计推力最大角”。对于一个具体的滑坡工程,设计推力最大角是恒定的;设计推力起始角随着第 $i-1$ 条块剩余下滑力的增大而减小,随着第 $i-1$ 条块剩余下滑力的减小而增大。

$0^\circ < \text{滑面倾角} < \text{设计推力起始角}$,设计推力 P 总等于 0。 $\text{设计推力起始角} < \text{滑面倾角} < \text{设计推力最大角}$,设计推力 P 以抛物线形式逐渐增大至最大值。 $\text{设计推力最大角} < \text{滑面倾角} < 90^\circ$,设计推力 P 以抛物线形式从最大值逐渐减小。最大值两侧的抛物线形式推力曲线近似对称。

由 $P \geq 0$,可得:

$$(K_1 - W_i \tan \phi_i) \cos \alpha_i + (K_2 + K_s W_i) \sin \alpha_i \geq C_i L_i + C_i a h_i / b \tag{18}$$

由 $P'(\alpha_i) = 0$,可得:

$$\begin{aligned} &K_s K_5 (\cos^3 \alpha_i - \tan \phi_i \sin^3 \alpha_i) + \\ &K_s K_3 K_5 (\cos^2 \alpha_i - \sin^2 \alpha_i) + \\ &K_5 \tan \phi_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i (\tan \phi_i \sin \alpha_i + \cos \alpha_i) + \\ &2 K_3 K_5 \tan \phi_i \sin \alpha_i \cos \alpha_i + \\ &(K_5 \tan^2 \phi_i + K_2 K_3) \cos \alpha_i - \\ &K_1 K_3 \sin \alpha_i + K_4 (\cos \alpha_i \tan \phi_i - \sin \alpha_i) - \\ &K_1 \tan \phi_i + K_2 = 0 \end{aligned} \tag{19}$$

式中:

$$K_1 = P_{i-1} (\cos \alpha_{i-1} - \sin \alpha_{i-1} \tan \phi_i) \tag{20}$$

$$K_2 = P_{i-1} (\sin \alpha_{i-1} + \cos \alpha_{i-1} \tan \phi_i) \tag{21}$$

$$K_3 = B \tan \phi_i / 2b \tag{22}$$

$$K_4 = C_i L_i + C_i a h_i / b \tag{23}$$

$$K_5 = \gamma (h_i + h_{i-1}) L_i / 2 \tag{24}$$

式(16)取等号即为设计推力起始角的一般表达式,式(17)即为设计推力最大角的一般表达式。

在滑坡治理工程设计中,支挡工程布设位置的滑面倾角建议不大于上一条块的滑面倾角,如受地形限制不能满足上述条件,则支挡工程布设位置的滑面倾角与上一条块的滑面倾角之差值不大于 5° 。

4.2 桩截面尺寸对抗滑桩设计推力的影响分析

4.2.1 桩截面高度 a 对抗滑桩设计推力的影响分析

在分析桩截面高度 a 对抗滑桩设计推力的影响时,设定第 $i-1$ 条块的剩余下滑力 P_{i-1} 、滑面倾角

α_{i-1} 、滑体厚度 h_{i-1} 和第 i 条块的滑面长度 L_i 、滑面倾角 α_i 、滑体厚度 h_i 不变,且桩截面宽度 b 、桩中至中的间距 S 也保持不变,仅变化桩截面高度 a 的大小。

由式(10)可知,设计推力 P 是桩截面高度 a 的一次函数,随着桩截面高度 a 的增大,设计推力 P 以直线形式单调减小。由 $P \geq 0$ 可知桩截面高度 a 存在最大值,即:

$$a \leq \frac{[P_{i-1}\varphi_{i-1} + W_i(K_s\sin\alpha_i - \cos\alpha_i\tan\phi_i) - C_iL_i]b}{C_ih_i}$$

(25)

4.2.2 桩截面宽度 b 对抗滑桩设计推力的影响分析

在分析桩截面宽度 b 对抗滑桩设计推力的影响时,同样设定第 $i-1$ 条块的剩余下滑力 P_{i-1} 、滑面倾角 α_{i-1} 、滑体厚度 h_{i-1} 和第 i 条块的滑面长度 L_i 、滑面倾角 α_i 、滑体厚度 h_i 不变,且桩截面高度 a 、桩中至中的间距 S 也保持不变,仅变化桩截面宽度 b 的大小。

由式(10)可知,设计推力 P 在桩截面宽度 b 的取值范围内是单调递增函数。随着桩截面宽度 b 的增大,设计推力 P 以抛物线形式单调增加。由 $P \geq 0$ 可知桩截面宽度 b 存在最小值,即:

$$b \geq \frac{C_ih_ia}{P_{i-1}\varphi_{i-1} + W_i(K_s\sin\alpha_i - \cos\alpha_i\tan\phi_i) - C_iL_i}$$

(26)

4.3 桩间距对抗滑桩设计推力的影响分析

在分析桩间距 S 对抗滑桩设计推力的影响时,同样设定第 $i-1$ 条块的剩余下滑力 P_{i-1} 、滑面倾角 α_{i-1} 、滑体厚度 h_{i-1} 和第 i 条块的滑面长度 L_i 、滑面倾角 α_i 、滑体厚度 h_i 不变,且桩截面高度 a 、宽度 b 也保持不变,仅变化桩中至中的间距 S 的大小。

由式(10)可知,设计推力 P 是桩间距 S 的幂函数,随着桩间距 S 的增大,设计推力 P 单调减小。

5 实例应用

(1) 利用文献[23]的工程实例,来验证基于土拱效应的抗滑桩设计推力计算方法的合理性。

文献[23]中抗滑桩截面尺寸 $a=3\text{ m}$ 、 $b=2.5\text{ m}$ 、桩间距 $S=7\text{ m}$ 、桩长 30 m 。滑坡体的参数如下: $C_i=19\text{ kPa}$ 、 $\varphi_i=10.2^\circ$ 、 $\alpha_i=10^\circ$ 、 $h_i=20\text{ m}$ 。利用上述参数计算抗滑桩的设计推力,进而求得抗滑桩的最大弯矩理论值为 $22\,942.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

实际工程中抗滑桩的最大弯矩设计值为 $85\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$,现场监测结果显示最大弯矩实际值为 $11\,012.36\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。抗滑桩的最大弯矩实际值仅为

设计值的 13% ,为本文所提方法计算理论值的 48% 。本文所提方法更接近于实际受力状态,但仍有一定差距,分析其原因,可能是滑坡体的计算参数偏低。

滑坡治理工程设计应重视现场勘查,准确把握滑坡体目前的稳定状态,合理确定滑坡体的计算参数及安全系数,这是滑坡治理工程的首要关键性工作。

(2) 某滑坡治理工程中,抗滑桩截面尺寸高度 $a=3\text{ m}$ 、宽度 $b=2\text{ m}$ 、桩长 30 m ,其中嵌固段长度 10 m (从桩靠坡侧滑面起算),桩心水平距离(中至中)为 6 m 。拟设工程位置其它参数如下: $C_i=21\text{ kPa}$ 、 $\phi_i=24.5^\circ$ 、 $\alpha_i=30^\circ$ 、 $h_i=20\text{ m}$ 。

在安全系数取 1.10 的情况下,上下两排抗滑桩的设计推力与滑坡剩余推力对比见表2。

表2 抗滑桩的设计推力与滑坡剩余推力对比表

位置	设计推力 水平分力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	桩身设计参数		剩余推力 水平分力 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
		截面尺寸	桩间距/ m	
上排桩	2980.0	2 m×3 m	6	4884.0
下排桩	2951.5	2 m×3 m	6	4646.6

从表2可以看出,拟设上排桩位置剩余推力的水平分力为 $4\,884.0\text{ kN/m}$,在拟定抗滑桩截面尺寸高度 $a=3\text{ m}$ 、宽度 $b=2\text{ m}$ 、桩间距为 6 m 时,设计推力的水平分力为 $2\,980.0\text{ kN/m}$,设计推力的水平分力为剩余推力水平分力的 61% 。拟设下排桩位置剩余推力的水平分力为 $4\,646.6\text{ kN/m}$,在拟定抗滑桩截面尺寸高度 $a=3\text{ m}$ 、宽度 $b=2\text{ m}$ 、桩间距为 6 m 时,设计推力的水平分力为 $2\,951.5\text{ kN/m}$ 。设计推力的水平分力为剩余推力水平分力的 63.5% 。此分析结果与第4节的结论相吻合,进一步验证了基于桩间土拱效应的抗滑桩设计推力的计算方法的合理性。

6 结 论

在滑坡治理工程设计中,必须首先计算得出抗滑桩所承受的滑坡推力。对于推力较大、滑动面较深、滑面倾角较大的大型高陡堆积体滑坡尤为重要,其推力的大小和分布形式对抗滑桩桩身内力及其弯矩的计算结果影响较大。

在分析抗滑桩桩间土拱效应形成机理的基础上,根据桩间土拱效应机理,推导了抗滑桩设计推力的计算公式,它不仅与滑坡的强度参数有关,还与抗滑桩的截面积、桩间距等设计参数有关^[28];结合工程实例,进行抗滑桩设计推力与常规设桩处的剩余

推力的对比分析及抗滑桩设计推力的影响因素分析,并验证了本文所提计算方法的正确性。因此,在设计抗滑桩时应尽可能使桩间产生土拱效应,发挥土拱对桩间土体的稳固作用。

鉴于目前关于抗滑桩受力的现场监测资料较少,在后续工作中,还将开展室内物理模型试验,对基于土拱效应的抗滑桩设计推力计算公式的正确性及适用性做进一步的验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王恭先. 滑坡支挡建筑物的发展动向滑坡文集(第十三集)[M]. 北京:中国铁道出版社,1998:60-64.
- [3] Tschebotari G P. Foundations, retaining, and earth structures[M]. New York: McGraw-Hill, 1973.
- [4] Poulos H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1973, 99(sm5):391-406.
- [5] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996:1-292.
- [6] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1):7-17.
- [7] 徐邦栋. 滑坡检算[J]. 土木工程学报, 1960(2):26-35, 41.
- [8] Janbu N. Slope stability computation. embankment- dam engineering, casagrande volume[M]. New York: John Wiley & Sons, 1973:47-86.
- [9] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Geotechnique, 1965, 15(1):79-93.
- [10] Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces[J]. Geotechnique, 1967, 17(1):11-26.
- [11] Sarma S K. Stability analysis of embankments and slopes[J]. Geotechnique, 1973, 23(3):423-433.
- [12] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都:成都科技大学出版社,1987:92-150.
- [13] 王复来. 土石坝边坡的滑动稳定计算[J]. 北京:中国水利水电技术, 1979(9):9-10.
- [14] Chen Z Y, Morgenstern N R. Extensions to the generalized method of slice for stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1):104-119.
- [15] 陈祖煜. 土坡稳定分析通用条分法及其改进[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(4):11-27.
- [16] 陈祖煜,邵长明. 最优化方法在确定边坡最小安全系数方面的应用[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(4):1-14.
- [17] 沈尧亮,侯殿英. 传递系数法的原型与衍生[J]. 工程勘察, 2010(S1):477-486.
- [18] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [19] 工业与民用建筑工程地质勘察规范:TJ21—77[S]. 1977.
- [20] 滑坡防治工程勘察规范:DZ/T 0218—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [21] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [22] 戴自航,张晓咏,邹盛堂,等. 现场模拟水平分布式滑坡推力的抗滑桩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10):1513-1518.
- [23] 王秀丽,金兆鑫,董文燕,等. 舟曲锁儿头滑坡抗滑桩监测及分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5):124-128.
- [24] 姚志勇,程谦恭,孟祥龙. 观音堂隧道高边坡抗滑桩现场监测分析[J]. 路基工程, 2010(3):95-97.
- [25] 罗丽娟,江冠,胡志平,等. 人工挖孔抗滑桩护壁与桩身结构相互作用模型试验[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2015, 47(3):53-63.
- [26] 黄治云. 抗滑桩桩间拱效应与桩板土压力研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [27] 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.
- [28] 艾章婵,窦俊,周云东,等. 基于土拱效应的抗滑桩临界桩间距影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012(5):143-146.