

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.08.008

双排抗滑桩布设方式对推力分配的影响

汪源¹, 谢强¹, 张建华²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市市政管理委员会, 重庆 400000)

摘要: 双排抗滑桩的推力分配问题在规范中没有明确说明。实际工程中, 前后排抗滑桩的推力分配往往只能依靠工程师的经验判断。为研究双排桩布桩方式对桩受力的影响, 寻找推力在双排桩中的分配规律, 文中依托四川省丹巴地区某公路滑坡治理项目, 通过建立有限元模型, 分析不同布桩条件下, 边坡的安全系数及滑坡推力在前后排抗滑桩上的分配情况。结果表明, 桩的布设方式对边坡的安全性有重要影响, 存在 1 个合理桩排距, 使滑坡的安全系数达到最大; 前后排桩的推力分配比例, 会随着不同的布桩条件而变化, 是一个动态的过程, 当排距为 30 m 时, 前后两排桩承担的推力最为接近。

关键词: 双排抗滑桩; 推力分配; 有限元; 安全系数; 强度折减法

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)08-078-10

Effect of double-row anti-slide piles on thrust distribution

WANG Yuan¹, XIE Qiang¹, ZHANG Jianhua²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Municipal Administration Committee, Chongqing 400000, P. R. China)

Abstract: At present, there is no clear design specification for the design of double-row anti-slide piles. In the design process, the thrust distribution between the front-row and back-row anti-slide piles is solely based on experiential judgement. To investigate the thrust share ratios basis between front-row and back-row piles, this paper establishes a series of finite element models to analyze the safety factor of slopes and the magnitude of landslide thrusts under various pile conditions. The findings show that the layout of piles has a significant impact on the slope's safety. There exists an optimal pile spacing that maximizes the safety factor against landslides. Moreover, the proportion of thrust distribution between the front-row and back-row piles varies with different pile conditions. When the row spacing is set to 30 m, the thrust of the two rows of piles is the most balanced.

Keywords: double row anti-slide pile; thrust share ratios; finite element method; safety factor; strength reduction method

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 重庆市地质灾害防治中心科技项目(KJ2021050); 重庆市规划和自然资源局科研项目(DK2021Z05null01C)。

Supported by the Science and Technology Project of Chongqing Geological Disaster Prevention Center (KJ2021050), and the Research Project of Chongqing Planning and Natural Resources Bureau (DK2021Z05null01C).

作者简介: 汪源(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) captain_wangyuan@foxmail.com。

通信作者: 谢强, 男, 博士, 教授, 博士生导师, (Email) xieqiang2000@sina.com。

抗滑桩对边坡的加固作用已被广泛认可,当滑坡规模较大时,需要设置两排甚至多排抗滑桩进行支挡^[1-3]。在双排抗滑桩的设计过程中,桩的前后排距、左右间距是双排抗滑桩设计的重要参数,前后排桩上推力的分配还只能依靠经验进行判断,没有形成明确的理论体系,因此,研究双排桩的排距和间距对前后排桩滑坡推力分配的影响就显得尤为重要。

对于滑坡推力在多排抗滑桩上分配,前人已经进行了一定数量的研究^[4]。叶金铎^[5]通过室内模型试验,改变前后排桩的数量比,发现在受荷段上,后排桩比前排桩的土压力大得多,为 1:0.4。祁斌等^[6]通过位移法,研究了不同净排距、前后排桩的截面尺寸和桩间土弹性模量对推力分配的影响,但在理论计算过程中,却把土体当作了完全弹性体,忽略了桩土之间的摩擦力。唐芬等^[7]通过建立有限元模型,分析不同排距下双排桩对推力的分担,认为当排距较小时,滑坡推力几乎全由后排桩承担,随着排距增加,前排桩分担的推力逐渐增加,当达到一定排距后,双排桩将完全独立工作。在此研究中,将抗滑桩这个空间问题简化成了平面问题,忽略了抗滑桩间距对边坡稳定性的影响。申永江等^[8]通过有限元计算,认为双排桩上的总推力要大于只设前排桩时的推力,而设置双排抗滑桩后,变形减小,桩前抗力不能充分发挥出来。周群华^[9]主要关注桩土的相互作用,通过三维数值分析,详细探讨了边坡加固工程中的桩身土压力分布型式、桩周土体位移变化等。周德培等^[10]将桩顶及以下的土拱作为主要的研究对象,推导了桩后土体的强度参数以及桩后坡体推力与桩间净距的关系,分析了桩后土体的抗剪强度参数 c 、 φ 及桩后坡体推力对理想桩间净距的影响。李会章^[11]以某多级剪出口滑坡为研究对象,通过对破碎岩石老滑坡的成因与滑动机制进行分析,明确促使滑坡复活的各种因素,建立有限元模型,通过数值计算方法得到边坡开挖过程、降雨过程与强度折减过程 3 种不同工况下,每排抗滑桩的滑坡推力分担比。杨波等^[12]讨论了两排桩在不同类型滑坡中,不同的折减系数下双排桩实际承担推力随排距的变化规律。于洋等^[13]基于单桩在桩周土体水平位移作用下的挠度解析解,通过引入桩顶连梁静力平衡条件和变形协调条件,建立桩周土体水平位移作用下的双排抗滑桩理论计算模型。Kourkoulis 等^[14]研究了不同桩间距、稳定土层厚度、桩的锚固深度、桩径和桩的布置方式下边坡加固效果。

综上所述,无论是数值分析还是理论推导^[15],大部分研究都只探讨了单方面因素的影响,没有进一步探讨各种布桩条件耦合下的结果^[16-17]。文中建立三维桩土共同作用有限元模型,利用强度折减法,分析不同布桩条件下,边坡的稳定性及抗滑桩的受力状态,为双排抗滑桩的设计提供依据^[18]。

1 工程背景

文中主要依托四川省丹巴某公路滑坡治理工程展开研究,现场情况如图 1 所示。由于该边坡坡度陡,下滑推力大,故设置双排抗滑桩进行支挡。目前,设计规范中对下滑推力在双排抗滑桩前、后排桩的推力分配问题没有明确说明,导致桩体荷载分配需要依靠经验。根据该项目的的设计成果,双排桩的前后排距设计为 34 m,左右间距设计为 6 m,下滑推力在前、后排桩中分配人为设定为 40%:60%,其合理性有待验证。



图 1 滑坡区全貌照

Fig. 1 The picture of landslide area

2 计算模型及工况

2.1 三维模型及边界条件

选取项目典型滑坡断面分析,利用有限元软件ABAQUS建立三维模型。根据张鲁渝等^[19]的结果,为减小约束边界对计算的影响,坡脚至模型边界的水平距离设置为坡高的1.5倍,坡顶至模型边界的水平距离设置为坡高的2.5倍,坡顶至模型底部约为坡高的2倍。模型四周施加垂直于边界面的水平位移约束,模型底面施加所有方向的位移约束。桩体长2 m、宽2 m、长26 m,嵌入滑床岩体15 m。桩、土之间设置接触面,模型如图2所示。

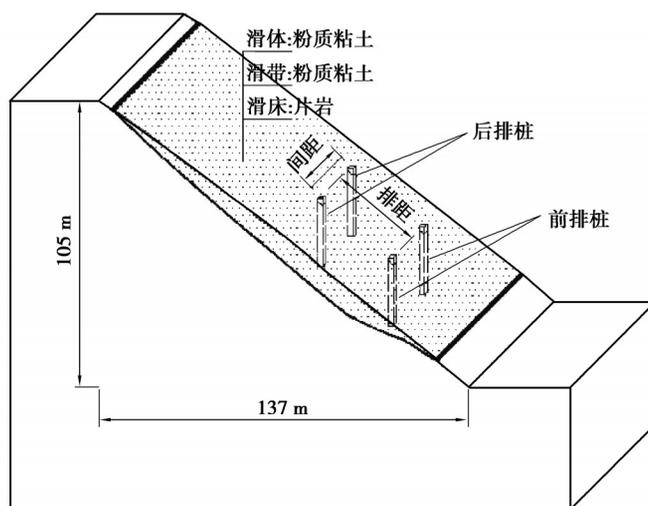


图2 计算模型图

Fig. 2 Numerical model

2.2 计算工况

有限元计算模型将前排桩放置在距离坡顶水平距离91 m的位置。保持其他条件不变,建立双排桩在不同桩距与不同排距条件下的有限元分析模型。其中,后排桩与前排桩的前后排距有10、20、30、40、50 m 5种工况,每排桩左右相邻的桩中心间距有4、6、8、10、12、14 m 6种工况。排距与间距的工况条件交叉组合,得到30组计算工况,命名规则如表1所示。

表1 计算工况命名规则

Table 1 Naming rules of calculation case

间距/m	工况名				
	排距 10 m	排距 20 m	排距 30 m	排距 40 m	排距 50 m
4	p10-j4	p20-j4	p30-j4	p40-j4	p50-j4
6	p10-j6	p20-j6	p30-j6	p40-j6	p50-j6
8	p10-j8	p20-j8	p30-j8	p40-j8	p50-j8
10	p10-j10	p20-j10	p30-j10	p40-j10	p50-j10
12	p10-j12	p20-j12	p30-j12	p40-j12	p50-j12
14	p10-j14	p20-j14	p30-j14	p40-j14	p50-j14

文中重点关注滑动土体及抗滑桩的受力情况,故滑坡岩层的网格尺寸在土体附近分隔较为细密,网格尺寸设置为2 m,随着与滑动土体的距离变远而逐渐增大。抗滑桩的网格分割尺寸为1 m。桩、土所有分隔单元皆为8节点6面体线性完全积分体。

2.3 参数选取

计算将实际岩土条件进行简化,岩土体设定滑坡土体、滑床、滑坡岩体 3 种材料。滑床岩体参数和滑坡土体参数通过结合勘察报告和当地地质资料确定。其中,滑床岩体设定为线弹性材料,而滑坡土体设定为弹塑性材料,遵守摩尔库伦定律。抗滑桩为钢筋混凝土材料,强度较高,视作线弹性材料。

由于该滑坡曾发生过大面积滑移,滑面贯通,具备反演分析条件。同时,现场调查发现,该区中下部及后缘裂缝发育,处于欠稳定状态,稳定性系数在 1.00~1.05 之间,利用其中 1 个剖面进行反演分析,确定滑带参数。桩、土计算参数如表 2 所示。

表 2 桩和岩土体的物理力学参数

Table2 Physico-mechanical paraments of piles, soil and rock

材料类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\Phi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
抗滑桩	30 000.0	0.2			25.0
滑坡土体	6.2	0.3	25.0	26.0	17.0
滑带	4.2	0.3	23.0	21.2	17.0
滑床岩体	4 500.0	0.2			25.0

3 计算结果及分析

3.1 桩布设方式对安全系数的影响

边坡安全系数,可看作边坡抗滑强度储备安全度,代表边坡抗滑能力大小^[20]。采用有限元强度折减法必须判定系统是否进入极限平衡状态,而对于确定边坡的临界失稳状态目前尚无统一标准,必须设定平衡判据作为依据。文中选取后排桩后土体的位移,取在折减系数增大过程中,出现拐点时的折减系数为该边坡安全系数的代表值。通过 Abaqus 中场函数功能,利用强度折减法,计算不同布设方案下边坡的安全系数。具体数据如图 3 和图 4 所示。

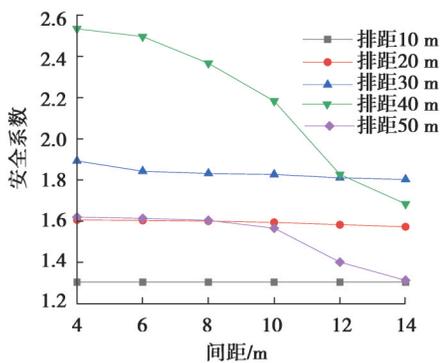


图 3 安全系数随桩排距离变化图

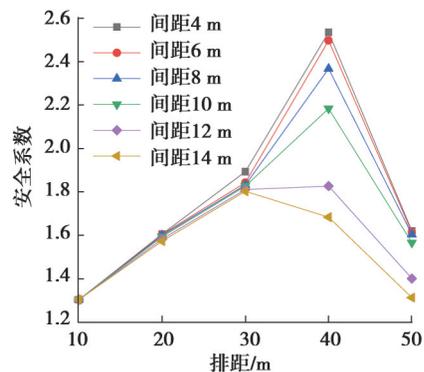


图 4 安全系数随桩间距离变化图

Fig. 3 Safety factor under different pile row spacing Fig. 4 Safety factor under different distance between piles

由图 3 可知,前后排距在 10~30 m 时,双排桩的间距变化对边坡安全系数的影响较小;在排距为 40 m 和 50 m 时,间距对安全系数的影响较为显著;排距为 40 m 时,随着间距的增大,边坡整体的安全系数明显减小。而当排距为 50 m、间距在 4~8 m 时,随着桩间距的增大,安全系数减小的幅度较为缓慢;而当间距大于 8 m 时,随着桩间距的增大,安全系数显著下降。可以认为,在排距较小时,抗滑桩的加固作用只能影响到部分土体,随着抗滑桩间距的变化,土体整体的安全系数没有显著变化。当排距增加到一定程度时,边坡大部分都受到抗滑桩的影响,此时,边坡的推力较大,土拱效应较强,对桩间距敏感。随着排距进一步增大,滑坡推力主要由前排桩承担,后排桩分担的推力有限,两排桩中间的一部分土体并没有受到有效支护,故安全系数下降。

在排距较小时,间距的变化对安全系数的影响并不显著,排距作为影响安全系数的主要因素,随着排距

的增加,抗滑桩的支挡作用充分发挥,边坡的安全系数明显上升。由图分析得出,当排距为40 m时,间距对安全系数的影响最为明显。当间距不变时,随着排距的增加,安全系数逐渐提高,当工况为p40-j4时,安全系数达到最高,抗滑桩的加固效应最为明显;而增加到50 m时,安全系数显著下降,此时,两排桩已各自独立,后排桩无法充分发挥作用,边坡发生局部破坏。

3.2 桩后压力分布形式

运用Abaqus路径功能,可以提取不同布桩条件下桩身前后压力的分布形式,限于篇幅,仅列出了桩间距为6 m时,不同排距下的桩身压力图,如图5所示。

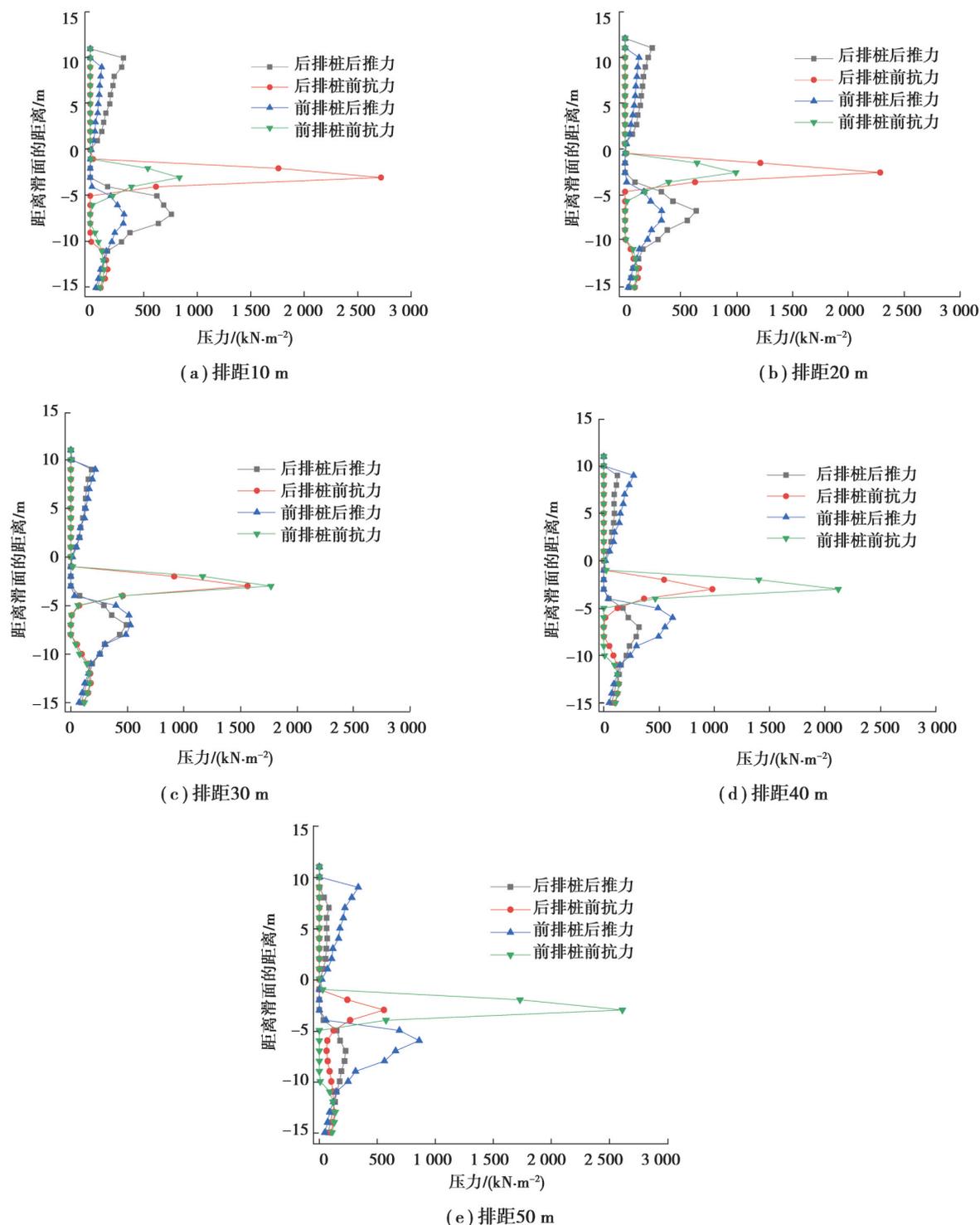


图5 桩间距为6 m时不同排距下的桩身压力图

Fig. 5 Pressure distribution of pile under different row spacing

由图 5 可知,对于桩后推力,无论是前排桩还是后排桩,滑面以上压力分布形式呈三角形,压力峰值的位置位于桩顶,在滑动面处压力减小为零。在滑动面以下,为了协调抗滑桩的变形,桩后的岩体也会对抗滑桩产生较大的压力,此压力与滑动面以上的压力大小有关,滑动面以上的滑坡推力越大,滑动面以下的协调压力也就越大。当排距较小时,后排桩的桩后压力明显大于前排桩,随着排距逐渐增大,后排桩桩后压力逐渐减小,而前排桩的桩后压力逐渐增大;当排距为 30 m 时,两者的桩后压力分布最为接近;当排距超过 30 m 时,前排桩的桩后压力将反超后排桩。

对于桩前抗力,无论前后排桩,在滑动面以上,滑动土体提供的抗力基本为零。由图 6 可知,桩前土体在重力作用下,有向下滑动的趋势,在滑动面以上的滑体将与桩体脱开,不承担任何抗力。而在滑动面以下,桩前抗力出现了一个峰值,结合应力云图,在桩前岩土分界面的岩体侧的一点,出现了应力集中点,可以将这个点看做岩体对抗滑桩的支点,由于这个支点的作用,滑动面以上的桩体产生了变形,桩需要通过滑面以下桩后较大的被动土压力来平衡滑面以上滑动土体的推力,该桩的桩后推力越大,该支点提供的抗力越大。所以,在排距较小的工况下,后排桩的桩前抗力明显大于前排桩的桩前抗力;当排距到达 30 m 时,后排桩与前排桩的抗力最为接近;当排距大于 30 m 时,前排桩的桩前抗力将明显超过后排桩。前、后排桩桩前抗力随排距变化的大小相对关系与桩后推力的变化规律基本一致。而在桩底,由于桩体的协调变形,桩底也产生了部分桩前抗力。

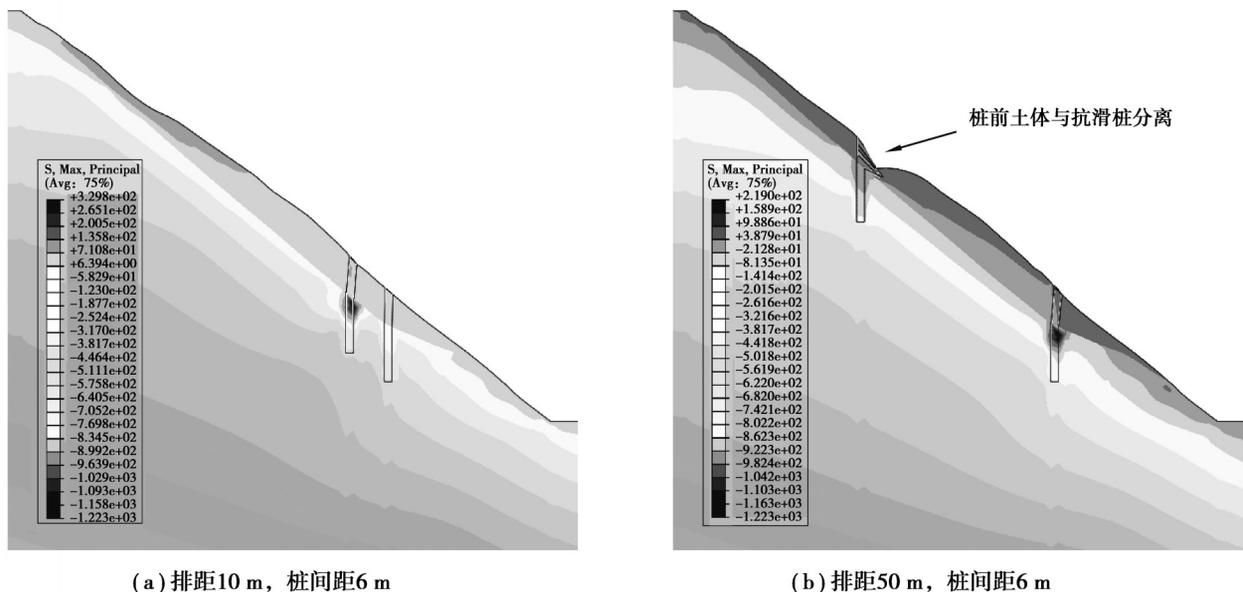


图 6 岩土体变形后大主应力云图

Fig. 6 Large principal stress contours on deformed shape

4 桩布设方式对桩后推力的影响

滑坡推力作为抗滑桩设计过程中重要参数,直接决定了抗滑桩设计结果。文中通过对桩后推力进行积分得出整体的推力大小,以此来研究双排抗滑桩的推力分配问题。

4.1 前排桩桩身推力

图 7 为不同布设条件下前排桩所承担推力示意图。图 7(a)表示,排距不变,间距增宽,前排桩需要支挡的滑动土体的范围增大,前排桩承担的推力也会相应增加。排距为 10 m 和 20 m 时,后排桩承担的推力总和随间距增大的趋势较为接近。可以认为,当排距较小时,后排桩对前排桩有明显的遮蔽效应,前排抗滑桩承受推力的大小随间距变化的速率较为稳定;排距为 50 m 时,推力随间距增长的速率明显大于排距小于 50 m 的其他工况,说明在排距较大的情况下,前排抗滑桩的推力总和对间距变化更为敏感。图 7(b)表示,间距不变,排距增大,前排桩承担的推力增大。随着排距的增大,双排桩协作作用减弱,前排桩需支挡的滑坡的范围扩

展,承担的推力明显增大。间距较大的工况,前排抗滑桩承担的推力随排距增大的变化幅度明显大于间距较小的工况。

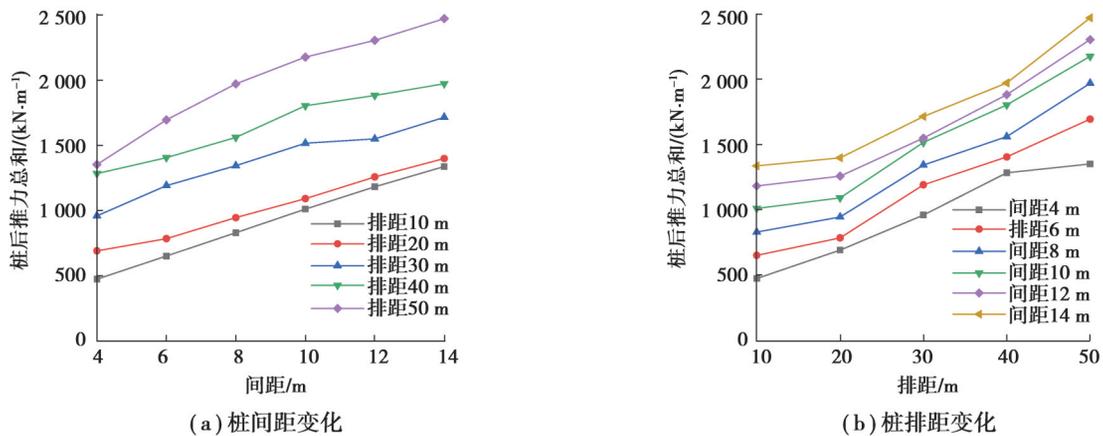


图7 前排桩承担的推力

Fig. 7 Thrust carried by the front-row piles

4.2 后排桩桩身推力

图8为不同布设条件下后排桩所承担推力示意图。图8(a)表示,排距不变,随着间距的增大,后排桩承担的推力也在增加。排距较大的工况,后排桩推力随间距增加的变化速率明显小于排距较小的工况。因为在排距较小时,后排桩承担的滑坡推力总量更大,分摊到每根桩上的压力会更大,间距的变化对推力数值的影响也会更明显。图8(b)表示,间距不变,随着排距的增大,对后排桩产生影响的滑体范围逐渐减小,后排桩承担的推力减小。但是不同间距条件下,推力随着排距的变化情况并不相同。当间距为10、12、14 m时,推力随着排距增加而减小的幅度非常显著,在间距为4、6、8 m工况下,当排距增大到30 m时,推力随着排距增大而减小的速率逐渐放缓。并且随着排距的增大,各间距工况下后排抗滑桩的推力数值差距明显减小。

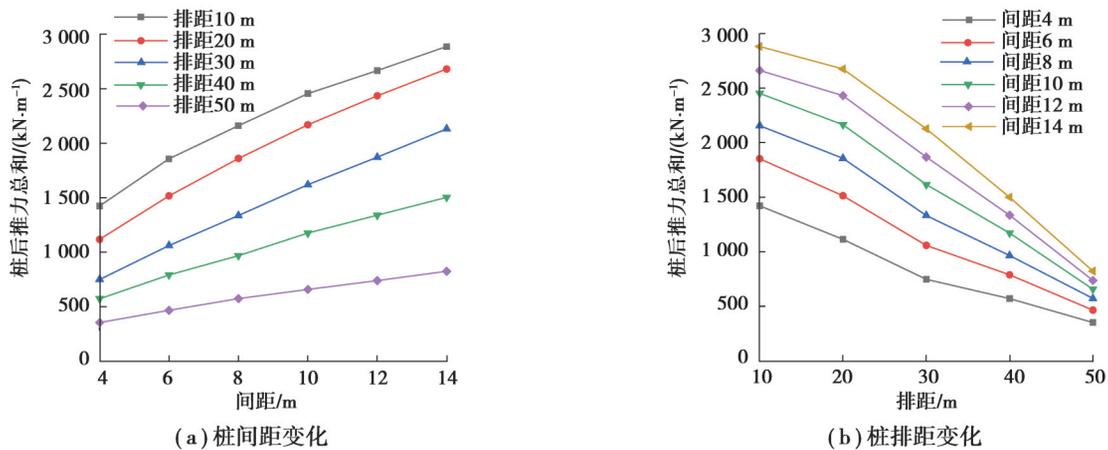


图8 后排桩承担的推力示意图

Fig. 8 Thrust carried by the back-row piles

4.3 推力总和

图9(a)为不同排距工况下前后排桩总和图,由图可知,随着间距的增大,各排距工况下抗滑桩推力总和都会明显增加。由图9(b)可知,不同的间距工况下,排距的变化对推力总和的影响不一致。当间距大于4 m的工况下,随着排距的增大,推力总和都有明显的减小;而当间距是4 m的工况下,排距在10~30 m的范围内,推力总和也是随排距的增大而减小;而当工况为p40-j4时,推力总和大于相同间距下的p30-j4和p50-j4工况。这与上面p40-j4工况下,安全系数达到最高的现象有一定关联。

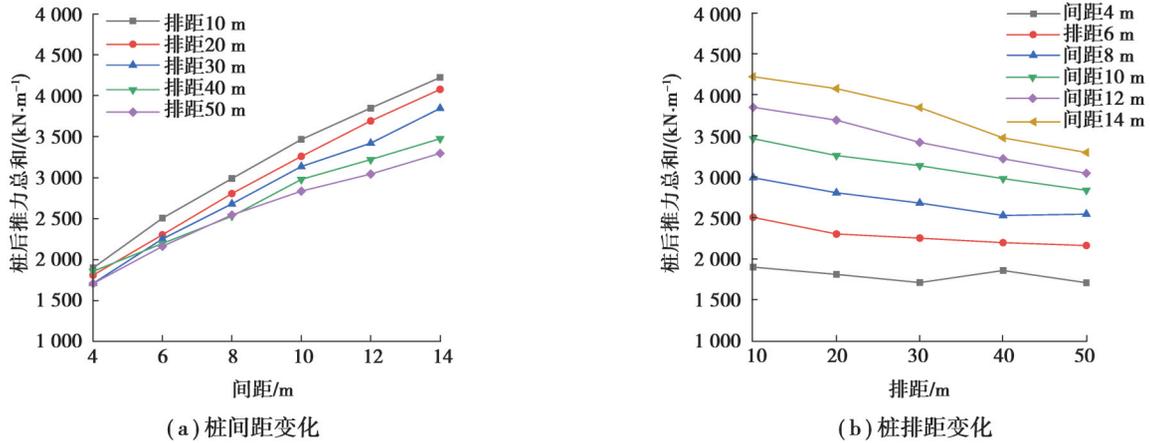


图 9 不同布桩条件下前后排桩总和图

Fig. 9 Total thrust of front and back piles under different pile conditions

5 结果分析

表 3 为不同布桩条件下前后桩推力分配比例表。由表可知,间距相同,排距较小的工况,后排桩承担的推力相对前排桩占比较大。当排距增大,后排桩承受推力占比减小,而前排桩的推力占比增加。当间距达到 30~40 m 时,前、后排桩承担的推力最为接近;当排距大于 40 m 时,前排桩的推力将大于后排桩;当排距达到 50 m 时,后排桩的推力占比仅为 21%~25%。

排距相同,桩间距的大小也会影响桩后推力的分配比例。排距在 10 m 的工况下,间距增大,后排桩承担的推力比例减小,前排桩承担的推力比例增大。排距在 20 m 工况下,间距变化对推力的分配比例的影响不明显。排距在 30~50 m 工况下,间距增大,后排桩承担的推力比例增大,前排桩承担的推力比例减小。

通过数值模拟结果来验证原有工程设计,桩排距为 34 m,桩间距为 6 m,设计后排桩承担 60% 的下滑力,前排桩承担 40% 的下滑力。根据有限元分析,可得后排桩大约承担 43% 的下滑力,前排桩承担大约 57% 的下滑力,与设计值存在差距。由此可以得出,原有设计具有一定的随意性,没有考虑桩土相互作用,忽略了双排桩自身的布设方式变化对抗滑桩受力的影响。可见抗滑桩受力和抗滑桩的布设方式是一个耦合的过程,在双排抗滑桩设计的过程中,需充分考虑桩排距和间距对前、后排桩推力的分配的影响,再依此计算出桩的受力情况。

表 3 不同布桩条件下前后桩推力分配比例表

Table 3 Thrust distribution ratio between front and back piles under different pile conditions

排距/m		前后桩推力分配比例/%					
		间距 4 m	间距 6 m	间距 8 m	间距 10 m	间距 12 m	间距 14 m
10	后排	75	74	72	71	69	68
	前排	25	26	28	29	31	32
20	后排	62	66	66	67	66	66
	前排	38	34	34	33	34	34
30	后排	44	47	50	52	55	55
	前排	56	53	50	48	45	45
40	后排	31	36	38	39	42	43
	前排	69	64	62	61	58	57
50	后排	21	22	23	23	24	25
	前排	79	78	77	77	76	75

6 结 论

在有限元建模方法基础上,分析双排抗滑桩不同的布桩条件对双排桩前后推力分配的影响。得出以下结论:

1)桩的布设方式对边坡的安全有重要影响。桩的间距越小,边坡整体的安全系数越高,且当排距较大时,此现象更为明显。存在一个合理的桩排距,在桩间距不变的情况下,使边坡的安全系数达到最大,在本工程中应为40 m。当桩的排距超过这个合理值时,前后排桩将进入独立工作的状态,边坡对桩的间距变化十分敏感。

2)在滑面以上大部分桩后土压力都成三角形,桩后的压力峰值的位置位于桩顶。随着排距逐渐增大,后排桩桩后压力逐渐减小,而前排桩的桩后压力逐渐增大,当排距为30 m时,两者的桩后压力分布最为接近。

3)桩前土体由于重力的作用,在滑动面以上的滑体将与桩体脱开,因而土体不承担任何抗力。而在滑面以下,滑床提供了一个支点,以抵抗滑体产生的桩变形,桩需要通过滑面下桩后较大的桩后被动土压力维持桩整体的稳定性。

4)前后桩的推力分配比例,会随着不同的布桩条件而变化。双排桩的排距大小将直接影响桩所能影响到的土体范围,推力的分配比例会发生较大变化,不能仅仅依靠经验预判。建议后续在类似项目中,双排抗滑桩荷载分配需要考虑双排抗滑桩的布设方式的影响,必要时可以使用数值计算软件对设计结果进行检验。

参考文献

- [1] Ito T, Matsui T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. *Soils and Foundations*, 1975, 15(4): 43-59.
- [2] Zhou C M, Shao W, van Westen C J. Comparing two methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles for a landslide in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Engineering Geology*, 2014, 173: 41-53.
- [3] 陈乐求, 杨恒山, 林杭. 抗滑桩加固边坡稳定性及影响因素的有限元分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 490-494.
Chen L Q, Yang H S, Lin H. Finite element analysis for slope stability and its influencing factors with pile reinforcement[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(2): 490-494.(in Chinese)
- [4] JI.K.金兹布尔格, 钟采元. 抗滑桩结构各桩排之间应力的分配[J]. *路基工程*, 1992(2): 63-69.
JI.K.金兹布尔格, Zhong C Y. Stress distribution among piles in anti-slide pile structure[J]. *Subgrade Engineering*, 1992(2): 63-69.(in Chinese)
- [5] 叶金铎. 悬臂式双排抗滑桩变刚度设计方法及桩间土拱效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Ye J B. Study on the stiffness effect of cantilever double-row anti-sliding piles and the soil arching between piles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [6] 祁斌, 常波, 吴益平. 双排抗滑桩滑坡推力分配影响因素分析[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(3): 359-363.
Qi B, Chang B, Wu Y P. Analysis of factors affecting distribution of landslide thrust force for double-row anti-slide piles[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(3): 359-363.(in Chinese)
- [7] 唐芬, 郑颖人, 杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 3162-3168.
Tang F, Zheng Y R, Yang B. Thrust share ratios and optimization design for two-row anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 3162-3168.(in Chinese)
- [8] 申永江, 吕庆, 尚岳全. 桩排距对双排抗滑桩内力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(7): 1033-1037.
Shen Y J, Lyu Q, Shang Y Q. Effect of pile row distance on internal stress of double-row anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 1033-1037.(in Chinese)
- [9] 周群华. 基于桩土相互作用的抗滑桩改进模式三维数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Zhou Q H. Three-dimensional numerical simulation of improved model of anti-slide pile based on pile-soil interaction[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [10] 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 D P, Xiao S G, Xia X. 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.(in Chinese)
- [11] 李会章. 多排抗滑桩的推力分配和计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

- Li H Z. Study on thrust distribution and calculation method of multi-row anti-slide piles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [12] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 237-244.
Yang B, Zheng Y R, Zhao S Y, et al. Two-row anti-slide piles in three kinds of typical landslide computations and stress rule analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 237-244.(in Chinese)
- [13] 于洋, 孙红月, 尚岳全. 基于桩周土体位移的双排抗滑桩计算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 172-178.
Yu Y, Sun H Y, Shang Y Q. Calculation model of double-row stabilizing piles based on displacement of soil around piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 172-178.(in Chinese)
- [14] Kourkoulis R, Gelagoti F, Anastasopoulos I, et al. Slope stabilizing piles and pile-groups: parametric study and design insights [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(7): 663-677.
- [15] Poulos H G. Design of reinforcing piles to increase slope stability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(5): 808-818.
- [16] 谢文亭. 抗滑桩支护结构与数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Xie W T. Research on design and numerical simulation of anti-slide pile supporting structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [17] 赵明华, 陈耀浩, 杨超炜. 考虑土拱作用抗滑桩合理桩间距确定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 16-21.
Zhao M H, Chen Y H, Yang C W. Methods for determining rational spacing between anti-slide piles considering soil arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 16-21.(in Chinese)
- [18] 马显春, 上官力. 基于抗滑承载力的单排抗滑桩最大桩间距计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 43-47, 93.
Ma X C, Shanguan L. Calculation method of the maximum distance of anti-slide piles in one row based on its capacity of shearing resistance[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 43-47, 93.(in Chinese)
- [19] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 21-27.
Zhang L Y, Zheng Y R, Zhao S Y, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 21-27.(in Chinese)
- [20] 朱泳, 朱鸿鹄, 张巍, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 833-840.
Zhu Y, Zhu H H, Zhang W, et al. Parametric analysis on factors influencing stability of slopes reinforced by anti-slide piles[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 833-840.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)