

有限元与极限分析法计算桩后推力的分析与比较

许江波^{1,3}, 郑颖人^{2,3}, 赵尚毅^{2,3}, 冯夏庭¹, 叶海林^{2,3}

(1. 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 400041;
3. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041)

摘 要: 极限分析法是常用的计算桩后推力的方法, 但计算中无法考虑桩的变形因素, 这种方法假定桩后岩土体变形不受限制, 抗滑力充分发挥, 计算出的推力是主动土压力。当桩变形受限制而使抗滑力不能充分发挥时, 计算结果与实际有偏差。有限元用于计算桩后推力时, 遵循桩-土共同作用的原则, 它不是极限分析法, 算出的推力依据桩的变形, 可能是主动土压力, 也可能不是主动土压力, 此外还可以得到相应的推力分布。当滑坡设计安全系数较小时, 岩土体抗滑强度未得到充分发挥, 有限元与极限分析法有一定差距; 随着设计安全系数的增大, 岩土体逐渐达到极限情况, 有限元与极限分析法算出的推力趋于一致。依据经验, 在一般桩设计安全系数下, 两者计算得出推力一致, 表明有限元用于计算桩后推力是可行的。本文对影响有限元计算推力的几种因素进行了分析, 并与极限分析法(不平衡推力法、Spencer 法)进行了比较, 说明了两种方法何种情况下计算结果一致, 何种情况下不一致。

关键词: 有限元法; 不平衡推力法; Spencer 法; 桩后推力

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)09-1380-06

作者简介: 许江波(1985-), 男, 河南安阳人, 硕士, 从事岩土体稳定性分析和数值模拟方面的研究。E-mail: xjb0137@163.com。

Comparison and analysis of landslide thrust by use of finite element and limit analysis methods

XU Jiang-bo^{1,3}, ZHENG Ying-ren^{2,3}, ZHAO Shang-yi^{2,3}, FENG Xia-ting¹, YE Hai-lin^{2,3}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 3. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazards Control, Chongqing 400041, China)

Abstract: The traditional limit analysis method is commonly used to calculate pile thrust, but it can not take the pile deformation into account. This method assumes that the deformation is unrestricted, the sliding force can be put into full play, and the calculated thrust is active stress. When the pile deformation is restricted and the stabilizing force can not be fully exerted, the calculated results are inaccurate. When the finite element method is used to calculate the pile thrust, it conforms to the pile-soil interaction principles and it is not the limit analysis method. The result based on the pile deformation may be active stress and the corresponding thrust distribution can also be obtained. When the pile design safety factor is small, the anti-slide strength of rock and soil is not fully exerted. The finite element method has some discrepancy with the traditional method. With the increase of discount factor, the rock and soil reaches the limit state gradually. The finite element method agrees with the traditional method. Based on the experience, the calculated thrusts by the two methods are the same under general design safety factor, indicating that the finite element method to calculate the pile thrust is feasible. Several factors for the finite element method to calculate the thrust are analyzed. A comparison between the proposed method and the traditional limit analysis method (unbalanced thrust law, Spencer method) shows that the calculated results are consistent or inconsistent under what cases.

Key words: finite element method; unbalanced thrust law; Spencer method; landslide thrust

0 引 言

传统的桩后推力计算, 包括土力学中支挡结构的侧向压力的计算, 都是基于极限分析理论, 即土体处

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目“山区村镇地质灾害防治技术研发(2006BAJ05A02)”; 重庆市自然科学基金项目(CSTC)(2009BB6178)

收稿日期: 2010-04-07

于极限状态,滑裂面上的抗滑力已充分发挥,这时作用在支挡结构上的推力最小,为主动土压力。通常设计中都以主动土压力作为支挡结构上的设计荷载,但达到极限状态需要支挡结构有充分的位移,有些情况下支挡结构的位移受到限制,此时一般以静止土压力与主动土压力之间的某一压力作为设计荷载,这一压力大于主动土压力。极限分析法无法算出支挡结构位移受限时的推力,也不能算出作用在支挡结构上的抗力及其推力与抗力的分布规律,表明传统计算方法具有局限性。随着有限元等数值方法在支挡结构上的应用,尤其是有限元等在边(滑)坡工程中的广泛应用^[1-5],运用有限元等数值方法计算支挡结构上的桩后推力引起人们的关注,这种现代算法究竟有何好处,与传统算法有何不同。这正是本文所要回答的问题。

极限分析方法与有限元计算方法的不同,首先在于两者的计算理念不同,前者基于极限分析,算出的推力是主动土压力;而后者是基于岩土体与支挡结构的共同作用,只要土体有变形就会对支挡结构形成压力,即使土体是稳定的,处于弹性状态,也会对支挡结构造成压力,这种压力是弹性形变压力,而按极限分析法计算支挡结构承担的压力为零。支挡结构随着岩土体的位移变化所承受的土压力逐渐变化,当支挡结构为刚性时,此时的压力即为静止土压力,随着支挡结构位移的增大,压力逐渐减小,处于静止土压力和主动土压力之间,直到位移达到某一数值,土体的抗滑力全部发挥,土体处于极限状态,这时的土压力即为主动土压力。静止土压力最大,主动土压力最小,处于静止和主动土压力之间的土压力介于其间。因而,当支挡结构允许有足够位移时,与传统算法一样,有限元算出的推力也是主动土压力;反之,算出的推力要大于主动土压力。除上述好处外,它还能算出支挡结构上的抗力、推力与抗力分布规律。当采用有限元强度折减法时还能计算合理的支挡结构高度,即合理桩长,以及有支护情况下边(滑)坡的安全系数等,以上功能是极限分析法不能做到的。不过,对于支挡结构设计,希望桩后推力越小越好,这就要求合理设计抗滑桩,并选取符合实际的岩土体参数^[6]。依据以往设计经验,只要设计合理、计算正确,一般情况下采用有限元算出的桩后推力可与极限分析法相当,达到经济合理的目的;但某些情况下,两种方法算出的结果有差异,因而设计计算中尚需要采用极限分析法验证其桩后推力是否正确合理。当两种算法不一致时,目前的认识还有一定差异,当桩的变形明显受到限制时,一般采用桩土共同作用理论作为设计依据。当滑

带强度较高而不能充分发挥抗滑力时,按理论也应按桩土共同作用计算。但按传统设计观念,应采用极限分析法计算,这需要进一步研究。

1 采用的计算方法

1.1 不平衡推力法

不平衡推力法是国内目前常用的桩后推力计算方法,目前边坡计算中安全系数有两类定义:强度储备安全系数和超载安全系数。由于本文计算中采用国际上通用的强度储备安全系数,因而在采用理正软件计算时,将超载安全系数设定为1,而对黏聚力和内摩擦角进行折减,使其成为采用强度储备安全系数的不平衡推力法,以便与有限元法进行比较。

1.2 Spencer法

Spencer法是一种严格满足力和力矩的平衡条件的条分法,为严格解法的一种,计算采用Geo-Slope软件。当应用此软件计算桩后推力时,可在滑体与桩的界面上施加一个集中力来平衡滑体,并改变施加的集中力的大小使滑体平衡,由此求出的集中力大小即为抗滑桩的桩后推力。在本文中,施加力的位置为距滑体底部1/3滑体高度处,计算表明集中力的施加位置对设计安全系数的影响不大。

1.3 有限元法

抗滑桩桩后推力应根据滑坡的设计安全系数将岩土体强度进行折减,通过应用ANSYS软件的计算功能直接求出抗滑桩的桩后推力。本次计算中的岩土体材料本构模型采用理想弹塑性模型,抗滑桩按照线弹性材料处理,抗滑桩可以采用实体单元和梁单元。本文计算中采用实体单元,实体单元可以直接计算桩后推力和抗力,并且能够直观反映抗滑桩截面的厚度。边界范围的取值为:坡顶到左端边界的距离为坡高的2.5倍,坡脚到右端边界的距离为坡高的1.5倍,且上下边界的距离不低于坡高的1倍^[7]。对于平面应变条件下的强度问题,可采用平面应变相匹配的D-P屈服准则^[8]。本文中采用的屈服准则是平面应变条件下与Mohr-Coulomb相匹配D-P关联流动准则(DP4)。由于有限元软件ANSYS^[9]提供的屈服准则为D-P外角外接圆(DP1)准则,因而需要进行转换。

2 有限元与极限分析法计算桩后推力的比较与分析

鉴于有限元与极限分析法这两种算法算出的支挡结构上推力有时相同,有时不同^[10],因而本文重点研究两种算法在何种情况下算出推力相同,又在何种情

况下不同。推力不同是由于支挡结构位移受到限制，而位移又与支挡结构的刚度（包括挡墙厚度与弹模）、滑带的强度（它与采用的设计安全系数有关）以及滑体与滑带的弹模大小等有关^[1]。下面通过3个例子对抗滑桩进行对比分析，说明两种方法算出的推力何种情况下相同，何种情况下不同及其原因。

2.1 滑面强度参数（通过改变设计安全系数体现）对两种推力计算方法的影响

(1) 算例一计算模型与参数

本算例中采用计算模型如图1所示，桩采用实体单元，桩与土体的接触关系采用共节点但材料性质不同的连续介质单元模型，这种模型可以较为真实的反映抗滑桩的截面高度，对抗滑桩的变形反映较为准确，但是采用平面应变计算时纵向只有1 m，也就是说，不论桩的截面宽度是多少，在程序计算时都是按1 m计算的，改变了抗滑桩的惯性矩，进而改变了抗滑桩的刚度，对抗滑桩的变形产生了影响。实际工程操作过程中，当桩的惯性矩 I 发生变化时，通过改变桩的弹性模量 E ，使抗滑桩的刚度 EI 保持不变，从而使桩的变形不受影响。本算例中，桩的宽度取1 m。有限元计算采用大型有限元通用软件 ANSYS，按照平面应变建立模型，抗滑桩截面尺寸为 $3.6 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，材料的物理力学参数见表1。此模型中坡高约为60 m，桩长38 m，其中桩埋深13 m。通过改变边坡的设计安全系数来体现滑带强度的变化，采用有限元法，利用 ANSYS 程序计算桩后推力，并用理正、Geo-slope 软件程序按极限分析法进行比较，不同方法算出的桩后推力见表2，不同计算方法的比较见表3。

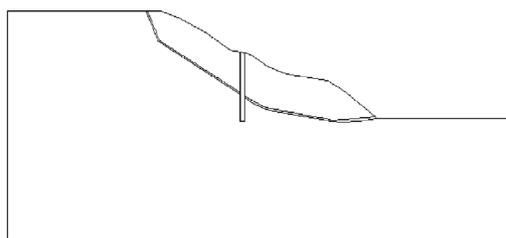


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model for slopes

表1 边坡采用的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for slopes

材料	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 (Pa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)
滑体	22.00	1×10^7	0.35	28	20
滑带	22.00	1×10^7	0.35	20	17
基岩	26.16	8.18×10^9	0.28	5000	39
桩	25.00	3×10^{10}	0.20		

表2 不同计算方法计算得到的桩后推力

Table 2 Landslide thrusts by different methods

单位: kN						
设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
有限元法	4356	4528	4743	4995	5259	5543
Spencer 法	3600	4050	4500	4900	5300	5650
不平衡推力法 (采用强度储备安全系数)	3397	3838	4256	4628	4973	5292

表3 不同计算方法下比较

Table 3 Comparison between different methods

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
不平衡推力法 (采用强度储备安全系数)与有限元法	22%	15%	10%	7.3%	4.8%	4.5%
Spencer 法与有限元法	17%	10.5%	5%	1.9%	1.3%	1.9%

(2) 算例二计算模型与参数

本算例中采用计算模型如图2所示，参数如表4所示。抗滑桩截面尺寸为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，材料的物理力学参数见表4。此模型中坡高约为20 m，桩长30 m，其中桩埋深10 m。

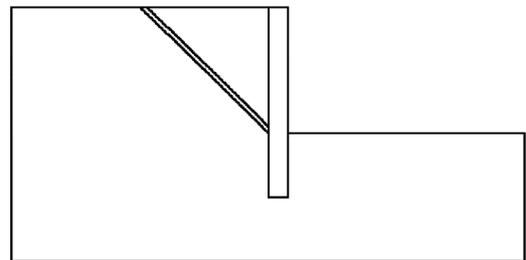


图2 计算模型

Fig. 2 Calculation model for slopes

表4 边坡采用的物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters for slopes

材料	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 (Pa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)
滑体	21	5×10^7	0.4	20	30
滑带	21	5×10^6	0.4	5	23
基岩	27	1×10^9	0.2	1800	37
桩	25	3×10^{10}	0.2		

表5 不同计算方法计算得到的桩后推力

Table 5 Landslide thrusts by different methods

单位: kN						
设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
不平衡推力法 (采用强度储备安全系数)	1408	1468	1523	1574	1620	1662
Spencer 法	1410	1490	1570	1630	1700	1760
有限元法	1479	1513	1550	1581	1615	1648

表 6 不同计算方法下误差比较

Table 6 Comparison of errors by different methods

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
不平衡推力法 (采用强度储备安全系数)与 有限元法	4.8%	3.0%	1.7%	0	0	1%
Spencer 法与有 限元法	4.6%	1.5%	1.3%	3%	5%	6.4%

(3) 计算结果分析

由表 3 和表 6 可以看出, 当设计安全系数 ≥ 1.15 时, 极限分析法与有限元法存在的差距很小, 这是因为滑面强度较小时, 土体达到了极限状态, 所以采用有限元和极限分析法计算结果一致。当设计安全系数 < 1.15 时, 由于滑面强度较高和抗滑桩的限制, 土体的变形较小, 采用有限元法计算时, 滑面没有达到极限状态, 抗滑力没有充分发挥, 抗滑桩的桩后推力大于极限分析法得出的土压力值。因而有限元与极限分析法计算结果随设计安全系数减少, 其推力差异逐渐增大。可见, 滑面的强度在采用有限元计算时, 对推力是有影响的。一般情况下抗滑桩的设计安全系数在 1.15~1.30 之间, 抗滑桩多数都可以达到极限状态。

2.2 桩的厚度对两种推力计算方法的影响

由于抗滑桩的刚度会限制土体的变形, 有可能使土体达不到极限状态, 因而影响桩后推力的计算, 下面对算例一采用不同的桩体厚度, 按有限元计算桩后推力, 并与极限分析方法比较。

(1) 计算结果对比

表 7 不同桩厚情况下桩后推力

Table 7 Pile thrusts at different pile heights 单位: kN

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
桩厚 3 m	4197	4428	4651	5073	5270
桩厚 3.6 m	4356	4528	4743	4995	5259
桩厚 5 m	4350	4560	4736	4979	5348
Spencer 法	3600	4050	4500	4900	5300

表 8 不同桩厚情况下桩后推力误差比较

Table 8 Comparison of errors at different pile heights

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
桩厚 3 m 与 3.6 m	3.6%	2.2%	1.9%	1.5%	0
桩厚 3 m 与 5 m	3.5%	2.9%	1.8%	1.9%	1.5%
桩厚 3.6 m 与 5 m	0	0	0	0	2%

(2) 计算分析

由表 8 看出, 桩厚变化对桩后推力的影响不大。在设计安全系数较大时, 桩厚变化对推力基本没影响; 当设计安全系数较小时, 桩厚对推力的影响也不大, 但与上述结论一样, 设计安全系数小于 1.15 时, 无论桩的厚度如何, 都没有达到极限状态。

同时可看出, 设计安全系数较小时, 桩厚较小的抗滑桩刚度小, 允许岩土体发生一定的变形, 桩所承

受的桩后推力小于刚度大的抗滑桩, 当设计安全系数增大到一定程度, 刚度较小与刚度较大的抗滑桩所承受的桩后推力基本相等。

2.3 桩体弹模对两种推力计算方法的影响

由于抗滑桩的刚度会限制土体的变形, 有可能使土体达不到极限状态, 因而影响桩后推力的计算, 下面对算例一采用不同的桩的弹模, 按有限元计算桩后推力, 并与极限分析法比较。

(1) 计算结果对比

表 9 不同桩体弹模情况下桩后推力

Table 9 Pile thrusts under different elastic moduli of piles

单位: kN					
设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
桩体弹模 1×10^{10} Pa	4077	4298	4480	4840	5147
桩体弹模 3×10^{10} Pa	4356	4528	4743	4995	5259
桩体弹模 5×10^{10} Pa	4349	4557	4830	5078	5549
Spencer 法	3600	4050	4500	4900	5300

表 10 不同桩体弹模下桩后推力误差比较

Table 10 Comparison of errors of pile thrusts under different elastic moduli of piles

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
桩体弹模 1×10^{10} Pa 与 3×10^{10} Pa	6.4%	5.1%	5.5%	3.1%	2.1%
桩体弹模 1×10^{10} Pa 与 5×10^{10} Pa	6.4%	6.1%	7.3%	4.7%	7.3%
桩体弹模 3×10^{10} Pa 与 5×10^{10} Pa	0	1%	1.8%	1.6%	5.2%

(2) 计算分析

由表 10 可看出在相同设计安全系数下, 桩体混凝土弹模为 1×10^{10} Pa 时, 其计算得出的桩后推力稍小于采用真实弹模 3×10^{10} Pa 计算得出的桩后推力。从计算中可看出, 桩后推力随着桩体弹模增大而增大, 因而尽可能采用准确的弹模。

2.4 滑坡体弹模对两种推力计算方法的影响

由于滑体的刚度也会限制土体的变形, 弹模越大, 限制土体变形的能力就越大, 有可能使土体达不到极限状态, 因而影响桩后推力的计算。下面对算例一采用不同的滑体弹模, 按有限元法计算桩后推力, 并与极限分析法进行比较。

(1) 计算结果对比 (见表 11)

表 11 不同滑坡体弹模下桩后推力

Table 11 Pile thrusts under different elastic moduli of landslide

单位: kN					
设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
滑体弹模 1×10^7 Pa	4356	4528	4743	4995	5259
滑体弹模 3×10^7 Pa	4575	4610	4994	5221	5488
滑体弹模 5×10^7 Pa	4818	4957	5224	5436	5612
Spencer 法	3600	4050	4500	4900	5300

(2) 计算分析

由表 12 得出, 相同设计安全系数下, 桩后推力随

着滑体弹模的增大而增大。有限元计算中，滑坡岩土体刚度大，限制了土体变形，因而滑体弹模取值对桩后推力计算结果影响较大，这与极限分析法存在很大的差异，极限分析法中是与弹模无关的，因而在选用土体弹模时，必须采用准确的弹模才能更好地与实际情况相吻合。

表 12 不同滑体弹模时桩后推力误差比较

Table 12 Comparison of errors of pile thrusts under different elastic moduli of landslides

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
滑体弹模 $1 \times 10^7 P_a$ 与 $5 \times 10^7 P_a$	9.8%	8.8%	9.4%	8.3%	6.4%
滑体弹模 $1 \times 10^7 P_a$ 与 $3 \times 10^7 P_a$	4.8%	1.8%	5%	4.3%	4.2%
滑体弹模 $3 \times 10^7 P_a$ 与 $5 \times 10^7 P_a$	5%	7%	4.4%	4.0%	2.2%

2.5 滑带弹模对两种推力计算方法的影响

(1) 算例三计算模型与参数

由于滑带的弹模影响土体的变形，弹模越大，影响土体变形越大，有可能使土体达不到极限状态，因而影响桩后推力的计算。但当前对滑带弹模测量不多，一般按经验确定，当滑体与滑带强度相差不大时，采用相同的弹模；而当相差较大时，滑带弹模可取低于滑体弹模一个数量级的值。下面对算例一模型采用不同的滑带弹模，采用有限元法计算桩后推力，并与极限分析法比较。计算中采用的边坡模型如图 1 所示，物理力学参数如表 13 所示。

表 13 边坡采用的物理力学参数

Table 13 Physical and mechanical parameters for slopes

材料	重度 ($kN \cdot m^{-3}$)	弹性 模量/Pa	泊松 比	黏聚 力/Pa	内摩擦 角/($^\circ$)
滑体	22.00	1.00×10^7	0.35	28000	20
滑带	22.00	—	0.35	10000	10
基岩	26.16	8.18×10^9	0.28	5×10^6	39
桩	25.00	3.00×10^{10}	0.20	—	—

(2) 计算结果分析

由表 14 可以看出，相同设计安全系数下，桩后推力随着滑带弹模的增大而减小。有限元计算中，随着滑带弹模的增大，滑带与滑体的刚度逐渐接近，改变了滑带弹模较小时滑体阻止桩体变形的情况，桩体能够发生较大幅度的位移，所以所承受的桩后推力减小。

表 14 不同滑带弹模下桩后推力

Table 14 Pile thrusts under different elastic moduli of slip bands

设计安全系数	单位: kN				
	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
滑带弹模 $1 \times 10^6 P_a$	8355	8651	8883	9091	9388
滑带弹模 $3 \times 10^6 P_a$	8173	8394	8459	8613	9140
滑带弹模 $5 \times 10^6 P_a$	7875	8085	8290	8350	8854
Spencer 法	8200	8500	8700	9000	9250

表 15 不同滑体弹模时桩后推力误差比较

Table 15 Comparison of errors of pile thrusts under different elastic moduli of slip bands

设计安全系数	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20
滑体弹模为滑带弹模 的 10 倍与 Spencer 法	1.9%	1.7%	2.1%	1%	1.5%
滑体弹模为滑带弹模 的 3.3 倍与 Spencer 法	0	1.2%	2.8%	4.3%	1.2%
滑体弹模为滑带弹模 的 2 倍与 Spencer 法	4%	4.9%	4.7%	7.2%	4.3%

当滑带与滑体强度相差较大，因为岩土体弹模随着其强度的减小而减小。滑带与滑体弹模取值相差一个数量级时是合适的，计算结果见算例二和算例三。在算例二中当设计安全系数大于等于 1.1 时，推力计算结果与传统计算方法一致，而设计安全系数较小时，有限元计算结果稍大于极限分析法计算结果，这两个算例表明当滑带与滑体强度相差较大时，滑带与滑体岩土体采用相差一个数量级的弹模是合适的。

同时按算例一计算结果，当滑带与滑体强度相差较小时，滑带与滑体弹模取值相同是合适的。当设计安全系数大于等于 1.15 时，推力计算结果与传统计算方法基本一致，而设计安全系数较小时，有限元推力计算结果大于极限分析法计算结果，表明当滑带与滑体强度相差不大时，采用相同的弹模是合适的。

3 结 论

(1) 极限分析方法与有限元计算方法的不同，首先在于两者的计算理念不同，前者基于极限分析，算出的推力是主动土压力；而后者是基于岩土体与支挡结构的共同作用，算出的是介于静止土压力和主动土压力之间的土压力（由位移大小确定）。

(2) 有限元与极限分析法计算结果随安全系数增大，其推力差异逐渐趋于一致，这主要是当安全系数较大，有限元计算的物理参数 c ， φ 值折减到即将破坏时，土体达到塑性状态，与极限状态相近的缘故。

(3) 桩厚变化对桩后推力的影响不大。设计安全系数较小时，桩厚较小的抗滑桩刚度小，桩所承受的桩后推力小于刚度大的抗滑桩，当设计安全系数增大到一定程度，刚度较小与刚度较大的抗滑桩所承受的桩后推力基本相等。

(4) 在相同设计安全系数下，桩后推力随着桩体弹模的增大而稍有增大，这是由于随着弹模的增大，桩体刚度随之增大，桩体变形受到限制，承担的桩后推力随之增大。

(5) 在相同设计安全系数下，桩后推力随着滑体弹模的增大而增大，滑体弹模取值对桩后推力计算结果影响较大，因而在选用土体弹模时，必须采用准确

的弹模才能更好地与实际情况相吻合。

(6) 相同设计安全系数下, 桩后推力随着滑带弹模的增大而减小。随着滑带弹模的增大, 滑带与滑体的刚度逐渐接近, 改变了滑带弹模较小时滑体阻止桩体变形的情况, 桩体能够发生较大程度的位移, 所以抗滑桩所承受的桩后推力减小。

(7) 当滑体与滑带强度相差不大时, 采用相同的弹模是合适的; 当滑体与滑带强度相差较大时, 采用相差一个数量级的弹模是合适的。

参考文献:

- [1] 雷 用. 滑坡治理中抗滑短桩受力特性研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2007. (LEI Yong. The sliding characteristics of the short pile in landslide treatment[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2007. (in Chinese))
- [2] 郑颖人, 赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3552 - 3558. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Calculation of Inner Force of Support Structure for Landslide/Slope by Using Strength Reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3552 - 3558. (in Chinese))
- [3] 唐 芬. 下沉短桩越顶问题的有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(5): 103 - 107. (TANG Feng. FEM analysis of sliding face crossing over sinking pile[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, 26(5): 103 - 107. (in Chinese))
- [4] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 沉埋桩的有限元设计方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 27 - 33. (LEI Wen-jie, ZHENG Ying-ren, FENG Xia-ting. Study on finite element design methods of slope stabilized by deeply buried anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 27 - 33. (in Chinese))
- [5] 雷文杰. 埋入式抗滑桩加固滑坡体的有限元设计方法与大型物理模型试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. (LEI Wen-jie. The finite element design method of embedded piles in reinforced landslide and large-scale physical model test[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese))
- [6] 王海斌, 李永盛. 边坡稳定性有限元分析的处理技巧[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2386 - 2391. (WANG Hai-bin, LI Yong-sheng. Improved method of finite element analysis of stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2386 - 2391. (in Chinese))
- [7] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu, WANG Gong-xian, et al. slope and landslide treatment[M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [8] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000. (WANG Guo-qiang. Practical engineering simulation technology in the practice of ANSYS[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2000. (in Chinese))
- [9] 徐干成, 郑颖人. 岩土工程中屈服准则应用的研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 12(2): 93 - 99. (XU Gan-cheng, ZHENG Ying-ren. Geotechnical Engineering Applications of Yield Criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 12(2): 93 - 99. (in Chinese))
- [10] 梁 斌, 郑颖人, 宋雅坤. 不同计算方法计算桩后推力与桩前抗力的比较与分析[J]. 后勤工程学报, 2008, 24(2): 14 - 17. (LIANG Bin, ZHENG Ying-ren, SONG Ya-kun. Calculation of landslide thrust and resistant force in front of anti-sliding pile by using different methods[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24(2): 14 - 17. (in Chinese))
- [11] 王 钊, 陆士强. 强度和变形参数的变化对土工有限元计算的影响[J]. 岩土力学, 2005(12): 1892 - 1894. (WANG Zhao, LU Shi-qiang. Effects of variation of strength and deformation parameters on calculation results of FEM for soil engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(12): 1892 - 1894. (in Chinese))