

抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定

彭文哲, 赵明华[†], 肖尧, 杨超炜
(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘要:为合理分析抗滑桩加固后的边坡稳定性及确定最危险滑动面和最优桩位、桩长, 基于有限元极限分析软件 OptumG2 建立抗滑桩加固前后的边坡数值模型, 通过与已有研究中的边坡算例进行对比, 验证了本文数值分析方法的合理性; 然后, 基于算例验证的对比结果, 讨论了 OptumG2 的 2 种分析类型(重力乘数与强度折减)的区别并认为基于强度折减极限分析得出的安全系数偏于安全; 最后, 探讨了边坡坡度及抗剪强度(内摩擦角与粘聚力)对安全系数、最优桩位及桩长的影响, 分析了抗滑桩加固后的最危险滑动面变化规律, 根据参数分析结果拟合出安全系数公式, 得出一些规律性的结论并总结了 4 种常见的滑动面形式及其形成条件, 可为后续边坡稳定性分析理论研究提供参考, 具有一定的理论及工程应用价值。

关键词:抗滑桩; 边坡稳定性; 有限元极限分析; 最优桩位
中图分类号: TU473 **文献标志码:** A

Stability Analysis of Anti-slide Pile Reinforced Slope and Determination of Optimal Pile Position

PENG Wenzhe, ZHAO Minghua[†], XIAO Yao, YANG Chaowei
(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper is to analyze the stability with anti-slide pile reinforced slope and determine the critical failure surface, optimal pile position and pile length. Firstly, a numerical model of slope was established based on the finite element limit analysis software OptumG2. Secondly, two cases were employed to verify the rationality of the numerical analysis. Then, the differences between two different analysis types (gravity multiplier and strength reduction) of OptumG2 were discussed based on the comparison results and the safety factor based on the strength reduction limit analysis was biased towards safety. Finally, the effects of slope angle and soil shear strength (internal friction angle and cohesion) on safety factor, optimal pile position and pile length were investigated. In addition, the variation law of the critical failure surface of anti-slide pile reinforced slope was analyzed and the fitting equation of safety factor was derived based on the parametric study results. Some regular conclusions were presented, and four common sliding surface forms and their forming conditions were summarized. The results can provide reference for the subsequent theoretical research of slope stability analysis.

Key words: anti-slide pile; slope stability; finite element limit analysis; optimal pile position

* 收稿日期: 2019-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478178), National Natural Science Foundation of China(51478178)

作者简介: 彭文哲(1993—), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: mhzhaohd@21cn.com

边坡稳定性分析是边坡处治工程设计的依据,作为最直观评价标准之一,边坡稳定性安全系数的分析方法已日趋完善^[1-7]。然而,自然状态下边坡的安全系数往往难以达到一些重要工程的要求,因此,需要对边坡采取一定的加固措施改善其稳定性。抗滑桩因其抗滑能力强、适用范围广及施工便捷等优点而被广泛使用^[8-9],相比抗滑桩加固前的边坡,加固后的边坡稳定性分析更为复杂,已成为当前重要研究课题之一。

目前国内外诸多学者对经抗滑桩加固的边坡稳定性研究主要可分为试验研究^[10-14]、理论分析^[15-19]及数值模拟^[20-24]三个方面。

孙书伟等^[10]基于室内试验探究刚度较大抗滑桩的抗滑机制,认为桩后土体压裂破坏是抗滑桩变形的主要原因;戴自航等^[11]依托福建省某大型滑坡治理工程进行大型推桩现场试验,对抗滑桩分别施加矩形、三角形及抛物线形水平分布荷载,揭示不同分布形式滑坡推力作用下的抗滑桩受力及变形特性;刘洪佳等^[12]基于抗滑桩模型试验实测数据,分析滑坡推力分布形式、桩前土抗力的变化规律及抗滑桩-边坡系统的失稳模式,认为导致失稳的主要原因是桩前坡体达到屈服状态,桩顶位移过大,从而导致桩体发生折断破坏;傅翔等^[13]通过室内推桩模型试验,探究抗滑桩的倾覆破坏模式及相应的变形特征;章为民等^[14]为研究滑动面位置(深度)对抗滑桩的抗滑机理及其失稳破坏模式的影响,引入无量纲参数(锚固比),提出4种抗滑及破坏模式及其界限判别条件,并基于极限平衡理论推导出相应的极限抗滑力理论解,最终通过模型试验对此进行验证。然而由于试验难度较大,且难以量化边坡稳定性,国内外不少学者采用理论方法分析其稳定性。Hassiotis等^[15]基于摩擦圆法对边坡进行稳定性分析,并引入考虑抗滑桩的稳定数来确定新的最危险滑动面和安全系数;Ausilio等^[16]采用动态极限分析方法探讨了抗滑桩对边坡稳定性的影响,并提出抗滑桩最优位置的确定方法;李家平等^[17]采用瑞典法及简化 Bishop 法探讨了抗滑桩对边坡的加固效果,并认为抗滑桩最优桩位应为最危险滑动面最低处;年廷凯等^[18]基于强度折减理论及极限分析上限定理,确定了土坡的安全系数及潜在破坏模式,并在建立抗滑桩加固土坡的极限平衡状态方程的同时探讨了抗滑桩的最优桩位问题;梁冠亭等^[19]基于 Morgenstern-Price 法及自适应遗传优化算法,提出了抗滑桩加固边坡后的稳定性分析优化模型,搜索非圆弧最危险滑动面并探讨桩位

对边坡稳定性的影响。

然而,以上理论研究均需对边坡加固前后的最危险滑动面形状及位置进行假定,难以全面反映边坡-抗滑桩系统的耦合效应。考虑到数值分析方法能有效地弥补这一不足,雷文杰等^[20]基于有限元强度折减法对抗滑桩加固的边坡进行数值模拟,探讨桩位对边坡的稳定安全系数、最危险滑动面位置及形状的影响;李荣建等^[21]自行开发强度折减有限元程序,用以考虑抗滑桩及基质吸力对稳定性的影响;胡新丽等^[22]以张桓侯庙园区东侧滑坡为例,通过有限元软件 Geostudio,探讨不同桩位下的稳定性变化规律;陈乐求等^[23]采用 Fortran95 语言编制有限元程序,用以分析抗滑桩加固后的边坡稳定性,并探讨了抗滑桩支护参数对安全系数和滑动面的影响;王聪聪等^[24]基于有限差分软件 FLAC^{3D} 分析抗滑桩对边坡的加固效果,探讨桩位、桩长及桩体弹性模量等因素对边坡稳定系数及临界滑移面的影响,并提出了有效嵌固深度的概念。

综上所述,目前对抗滑桩加固后边坡稳定性分析已取得了一定的成果,但仍存在以下不足:①理论研究多为极限平衡法,需在事先假定滑动面形式再进一步搜索最危险滑动面,然而搜索最危险滑动面较为繁琐,其计算效率主要取决于假定的滑动面形式是否合理;②未能综合考虑边坡坡度、内摩擦角及粘聚力等边坡参数对最优桩位及桩长的影响;③未能全面考虑抗滑桩桩位及桩长对最危险滑动面的变化规律。

基于此,本文首先采用有限元极限分析软件 OptumG2 建立抗滑桩加固前后的数值模型,并通过算例验证了运用本文数值分析方法的可行性;然后,探讨边坡坡度及抗剪强度对安全系数、最优桩位及桩长的影响;最后,分析了抗滑桩加固后的最危险滑动面变化规律,以期为边坡处治工程设计提供一定的参考。

1 OptumG2 计算边坡稳定性的基本原理

如上所述,在抗滑桩-滑坡系统稳定性分析中,经典极限分析方法适用于工程设计,但需事先知道破坏面的位置;有限元法适应性广,但无法量化稳定性,求解其安全系数。二维有限元极限分析软件 OptumG2 与传统的极限分析方法相比,有限元极限分析不需要在计算之前假定边坡破坏形式,而是通过计算自动找出最危险滑动面;而相比有限元法,有限

元极限分析只需计算极限状态下的边坡稳定性,因而可以在不降低精度的前提下提高计算效率,兼有极限分析法与有限元分析法的优势,尤其适用于岩土工程中滑坡及隧道等工程的稳定性分析.考虑边坡稳定性安全系数有2种方式:1)重力乘数法.不断增大土体重度,并定义其安全系数 F_{Sy} 为边坡刚好失稳时的土体重度 γ_{cr} 和土体实际重度 γ 之比,即 $F_{Sy} = \gamma_{cr}/\gamma$;2)强度折减法.同比例降低土体强度指标 c 及 $\tan\varphi$,并定义其安全系数 F_{Ss} 为土体实际强度指标($c, \tan\varphi$)和边坡刚好失稳时的土体强度指标($c_{cr}, \tan\varphi_{cr}$)之比,即 $F_{Ss} = c/c_{cr} = \tan\varphi/\tan\varphi_{cr}$.总体而言,基于强度折减的安全系数比基于重力增大的安全系数更保守,即强度折减法算得的安全系数更小.2种安全系数计算方式各有其优点,一般认为实际边坡破坏源于土体强度的降低而非重力的增大,基于强度折减的安全系数更合理一些;而某些情况(现场或模型试验)下,由于坡顶堆载而引起边坡的破坏,此时重力增大的安全系数可能更符合实际. OptumG2 软件判断边坡破坏的方式为:滑面塑性区贯通或滑面上位移与应变将产生突变,产生很大的且无限制的塑性流动.

2 边坡数值模型的建立及验证

2.1 算例1(无抗滑桩加固的边坡)

为验证本文数值分析方法用于未加固边坡稳定性分析的合理性,现引入文献[2]中的边坡算例进行对比.假定某均匀土坡的破坏模式为坡脚破坏,数值模型中的土坡高度 H 、边坡坡度 β 、土体重度 γ 、内摩擦角 φ 和粘聚力 c 等参数见图1.根据图1的尺寸及参数建立边坡数值模型,见图2.土坡采用Mohr-Coulomb材料模拟.边界条件选取为标准边界条件,即模型左右两端约束横向位移,模型底部约束两个方向的位移.值得注意的是,OptumG2可采用重力增大及强度折减2种方式计算安全系数.通过“工况阶段管理器”界面选择分析类型“极限分析”或“强度折减”可以实现.

采用强度折减极限分析来分析时,时间范围设置为“长期”,单元类型选为上限或下限(分别用以计算上限解或下限解),单元数量设置为10 000.采用自适应网格,初始单元数量设置为1 000,进行3次自适应迭代,控制变量选为剪切耗散.在采用重力乘数极限分析来分析边坡稳定性时,需将乘数设置为“重力”,其余设置与强度折减极限分析均保持一致.

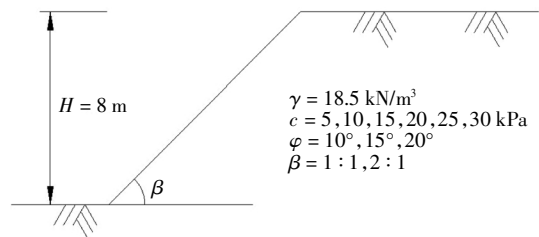
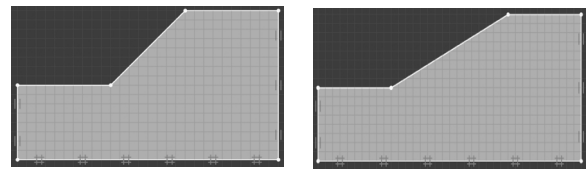


图1 边坡算例尺寸及参数(加固前)

Fig.1 Dimensions and parameters of slope case (pre-reinforced)



(a) $\beta = 1:1$

(b) $\beta = 2:1$

图2 算例边坡的数值模型(加固前)

Fig.2 Numerical model of slope case (pre-reinforced)

表1为本文数值分析结果与各参考文献的对比结果.对比可知:1)基于强度折减的安全系数与各参考文献值吻合较好,且与Bishop法及动态极限分析理论得出的安全系数非常接近,说明采用强度折减极限分析对边坡稳定性进行评价是合理的;2)总体而言,基于强度折减的安全系数相对于基于重力增大的安全系数更小一些,考虑到现有研究及工程多采用强度折减法分析边坡稳定性,因而,采用强度折减极限分析得到的安全系数偏于安全.

2.2 算例2(经抗滑桩加固的边坡)

为验证本文数值分析方法用于抗滑桩加固的边坡稳定性分析的合理性,现引入文献[15]中边坡算例进行对比.该边坡参数、抗滑桩桩长 h 及桩径 D 等如图3所示.

根据图3的尺寸及参数建立边坡数值模型,如图2所示.模型建立的过程与算例1几乎一致,唯一不同的是,需在离坡脚13.7 m处设置抗滑桩,抗滑桩采用线弹性模拟,如图4中灰色部分,抗滑桩基本参数选为:桩长 $h=25$ m,桩径 $D=0.91$ m,弹性模量 $E_p=30\ 000$ MPa,泊松比 $\nu=0.2$,桩体重度 $\gamma_p=24$ kN/m³.表2为基于本文数值分析的抗滑桩加固前后的安全系数与各参考文献的对比结果.

对比可知:1)抗滑桩可以有效地提高边坡的稳定性;2)本文基于强度折减极限分析的安全系数与各理论及数值分析推导结果相差不大,说明本文数值方法用以分析抗滑桩前后的边坡稳定性是合理的.

表 1 模型边坡稳定性安全系数的对比(算例 1)

Tab.1 Comparison of safety factors of slope stability calculated by different methods (Case 1)

β	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	无抗滑桩加固的边坡稳定性安全系数 F_{s0}							
			Bishop ^[25]	Huang and Yamasaki ^[26]	Cao and Zaman ^[2]	Ausilio ^[16]	重力乘数		强度折减	
							上限	下限	上限	下限
1 : 1	25	20	1.74	1.87	1.81	1.73	2.73	2.70	1.73	1.71
1 : 1	20	20	1.50	1.68	1.60	1.51	2.18	2.15	1.51	1.49
1 : 1	15	20	1.29	1.46	1.39	1.28	1.64	1.62	1.28	1.27
1 : 1	10	20	1.05	1.00	1.17	1.04	1.09	1.08	1.04	1.04
1 : 1	30	15	1.75	1.85	1.81	1.76	2.44	2.41	1.77	1.74
1 : 1	25	15	1.53	1.65	1.60	1.55	2.03	2.01	1.55	1.54
1 : 1	20	15	1.32	1.45	1.40	1.34	1.63	1.61	1.34	1.33
1 : 1	15	15	1.11	1.24	1.19	1.12	1.22	1.21	1.12	1.11
1 : 1	10	15	0.89	1.00	0.98	0.89	0.81	0.81	0.90	0.89
1 : 1	25	10	1.35	1.42	1.40	1.38	1.57	1.55	1.37	1.36
1 : 1	20	10	1.15	1.23	1.20	1.17	1.25	1.24	1.17	1.16
1 : 1	15	10	0.97	1.00	1.00	0.96	0.94	0.93	0.96	0.95
2 : 1	20	20	2.09	2.05	2.01	2.07	9.28	9.08	2.10	2.09
2 : 1	15	20	1.82	1.85	1.76	1.81	6.96	6.81	1.83	1.82
2 : 1	10	20	1.54	1.60	1.51	1.53	4.64	4.54	1.54	1.53
2 : 1	5	20	1.21	1.23	1.24	1.21	2.32	2.27	1.22	1.21
2 : 1	25	15	2.05	1.87	1.98	2.05	4.79	4.74	2.07	2.06
2 : 1	20	15	1.78	1.72	1.74	1.79	3.83	3.79	1.82	1.81
2 : 1	15	15	1.53	1.54	1.49	1.54	2.88	2.85	1.57	1.55
2 : 1	10	15	1.29	1.29	1.25	1.27	1.92	1.90	1.29	1.28
2 : 1	5	15	0.99	1.00	0.99	0.98	0.93	0.92	0.98	0.97
2 : 1	15	10	1.27	1.19	1.23	1.27	1.55	1.55	1.27	1.26
2 : 1	10	10	1.03	1.00	0.99	1.02	1.04	1.03	1.02	1.01

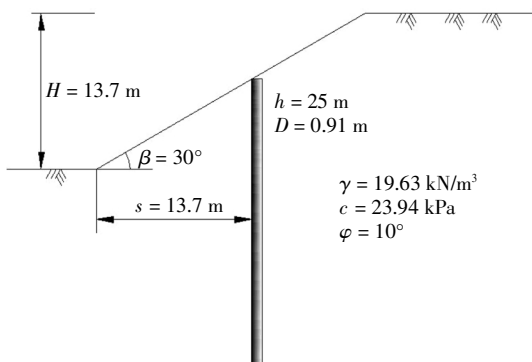


图 3 边坡算例尺寸及参数(加固后)
Fig.3 Dimensions and parameters
of slope case(post-reinforced)

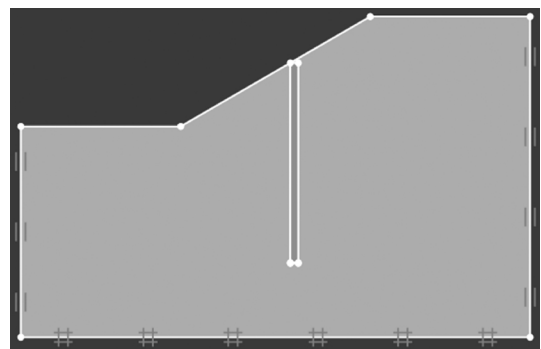


图 4 算例边坡的数值模型(抗滑桩加固)
Fig.4 Numerical model of slope
case(post-reinforced)

表 2 模型边坡稳定性安全系数的对比(算例 2)

Tab.2 Comparison of safety factors of slope stability calculated by different methods (Case 2)

加固前安全系数 F_0		加固后安全系数 F_s	
摩擦圆法 ^[15]	1.08	摩擦圆法 ^[15]	1.82
简化 Bishop ^[27]	1.12	简化 Bishop ^[27]	—
极限分析法 ^[16]	1.11	极限分析法 ^[16]	1.5
有限元法 ^[28]	1.10	有限元法 ^[28]	—
强度折减(上限)	1.11	强度折减(上限)	1.30
强度折减(下限)	1.10	强度折减(下限)	1.24

此外,通过 OptumG2 还可以得出抗滑桩加固前后的最危险滑动面,如图 5 所示. 图中高亮区域为剪切耗散较大的区域, 本文认为剪切耗散较大区域即为最危险滑动面,为验证本文观点的正确性,基于图形取点技术,将其与各参考文献进行对比,如图 6 所示. 对比可知:1) 本文数值分析得出的抗滑桩加固前

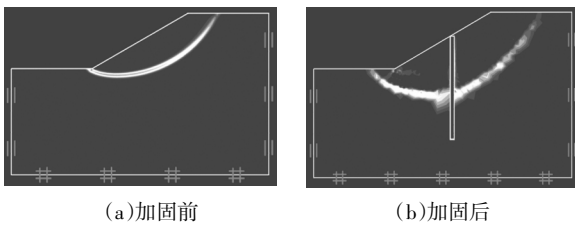


图 5 剪切耗散云图

Fig.5 Cloud diagram of shear dissipation

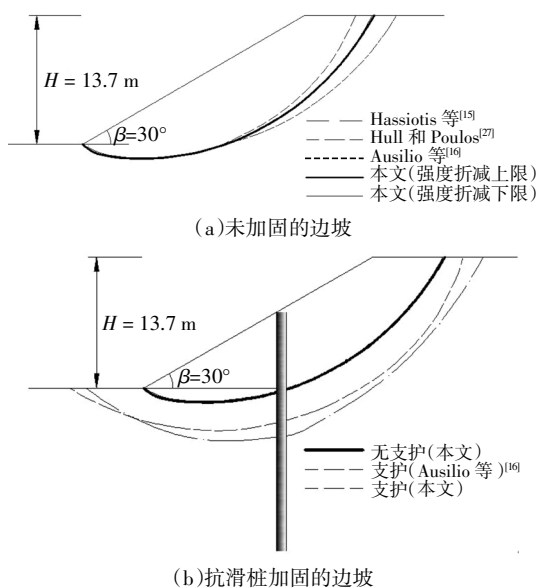


图 6 最危险滑动面的比较

Fig.6 Comparison of the critical failure surface of slope calculated

后的边坡最危险滑动面与各参考文献吻合较好,说明剪切耗散较大区域可以反映最危险滑动面形式; 2) 抗滑桩加固前, 各种方法计算出的边坡最危险滑动面均通过坡脚;3) 抗滑桩加固后, 边坡最危险滑动面的深度增加, 并且将不再通过坡脚.

3 参数影响分析

为综合考虑坡度、抗剪强度等对最优桩位及桩长的影响和最危险滑动面的变化规律, 在算例 2 的基础上进行参数分析,其取值情况如表 3 所示,考虑某一参数时,其他参数均保持不变.

表 3 边坡及抗滑桩参数取值

Tab.3 Parameter value of slope and anti-slide pile

边坡坡度 $\beta/(\circ)$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	粘聚力 c/kPa	抗滑桩离坡脚距离 s/m		抗滑桩桩长 h/m
			30°坡	45°坡	
30	5	20	5	2	5
45	10	25	10	4	10
—	15	30	15	6	15
—	—	—	20	8	20
—	—	—	—	10	25

基于不同边坡参数,改变桩位及桩长,求得相应的稳定性安全系数,如图 7~图 9 所示. 由图可知:

1) 边坡剪切强度对加固效果的影响. 不同粘聚力下的安全系数随桩长及桩位变化规律基本一致,而内摩擦角对抗滑桩加固效果的影响较大, 当内摩擦角较小时($\varphi=5^\circ$), 抗滑桩对边坡的加固效果不明显, 应尝试考虑其他加固方法; 随着内摩擦角的增大, 最优桩位逐渐由中部向中上部移动.

2) 桩长与最优桩位的影响. 桩长较小时, 抗滑桩靠近坡脚的安全系数最大, 桩长较长时, 抗滑桩位于边坡中部的安全系数最大; 桩位相同时, 安全系数随桩长增大而逐渐增大, 但桩长达到一定程度时, 继续增加桩长, 安全系数将不再增加, 因而工程实际中需结合边坡安全系数要求、工程造价及施工难度确定桩位.

3) 桩位对桩长-安全系数的影响. 当抗滑桩靠近坡顶或坡脚时, 桩长对于安全系数的影响很小; 当抗滑桩处于边坡中部时, 桩长的变化对于安全系数的影响最为显著, 尤其是边坡较陡时($\beta=45^\circ$), 靠近坡脚处抗滑桩的加固效果不明显, 当抗滑桩桩长较小时(0~10 m), 安全系数基本未发生变化.

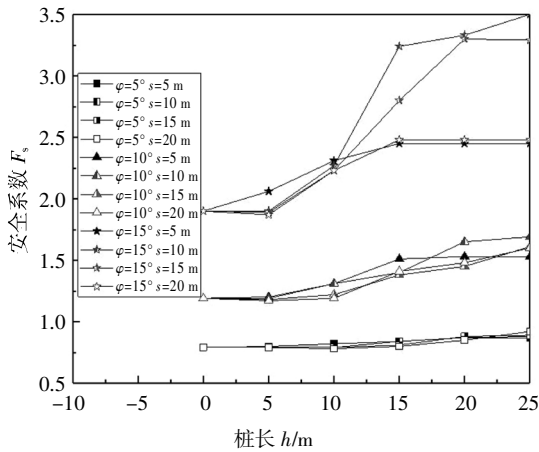


图7 内摩擦角、桩位及桩长对安全系数的影响
Fig.7 Effects of internal friction angle, pile position and pile length on safety factor

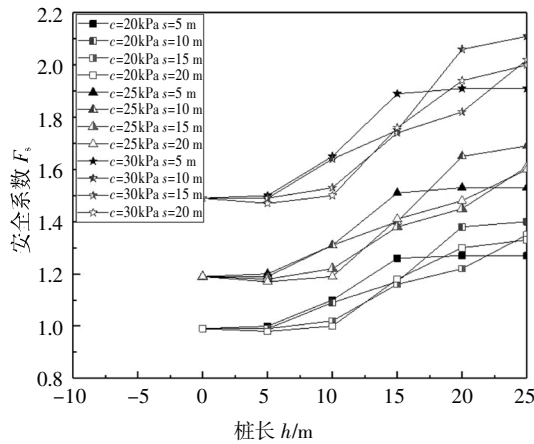


图8 粘聚力、桩位及桩长对安全系数的影响
Fig.8 Effects of cohesion, pile position and length on safety factor

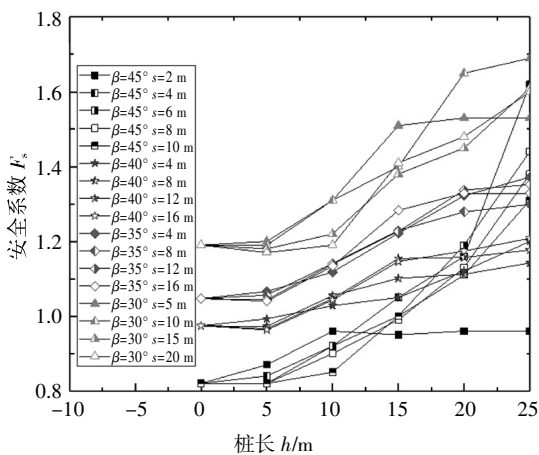


图9 边坡坡度、桩位及桩长对安全系数的影响
Fig.9 Effects of slope angle, pile position and length on safety factor

对参数分析所得数据进行非线性拟合,以便于后续的理论研究或工程应用.

$$F_s = Ah^3 + Bh^2 + Ch + D \tag{1}$$

其中:

$$A = 4 \times 10^{-8} \varphi \beta^2 - 2 \times 10^{-6} \varphi \beta - 3 \times 10^{-6} \varphi^2 + 6 \times 10^{-5} \varphi - 0.0001$$

$$B = -2 \times 10^{-3} \varphi \beta + 2.2 \times 10^{-3} \varphi^2 - 3.74 \times 10^{-2} \varphi + 0.7576$$

$$C = 7.5 \times 10^{-4} \varphi \beta - 0.06$$

$$D = -0.00241 \varphi \beta + 0.1819 + 0.05c - 1.122$$

显然, 桩长及桩位对加固效果的影响与加固前的边坡最危险滑动面紧密相关. 图 10(a)及图 10(b)为加固前边坡最危险滑动面的 2 种形式, 其中, 加固前滑动面大多通过坡脚, 如图 10(b)所示; 仅摩擦角较小时的少数边坡存在如图 10(a)所示最危险滑动面, 图中空心长方形代表参数分析中考虑的桩位及桩长.

结合图 7~图 9 的安全系数变化规律及图 10(a)(b)可以看出, 抗滑桩桩长需大于桩位处滑动面深度才会显现加固效果.

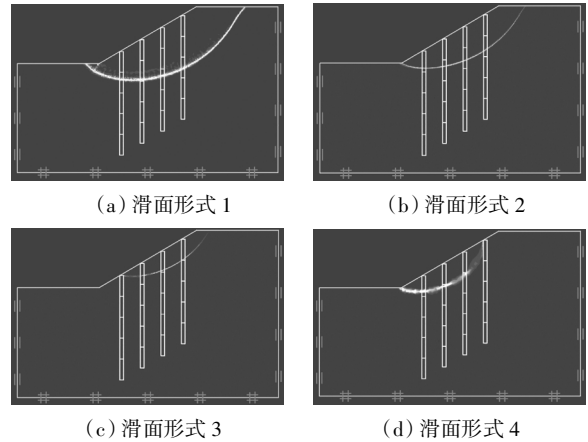


图 10 最危险滑动面形式

Fig.10 Form of the critical failure surface

桩长及桩位对最危险滑动面的影响如图 5(b)、图 10 及图 11 所示. 当桩长较小时, 大多呈现出如图 11 所示的滑动面, 即滑动面未穿过抗滑桩而是绕过抗滑桩底部. 随着桩长的不断增大, 最危险滑动面逐渐向边坡内部移动. 最终, 根据桩位的不同, 将出现 3 种最危险滑动面情况: 1) 桩位靠近坡脚时, 大多呈现出如图 10(c)所示的滑动面; 2) 桩位靠近坡顶时, 大多呈现出如图 10(d)所示的滑动面; 3) 桩位处于边坡中部时, 当桩长达到某一深度, 边坡的滑动面将不再随着桩长加深, 而是发生突变穿过抗滑桩, 如图 5(c)所示.

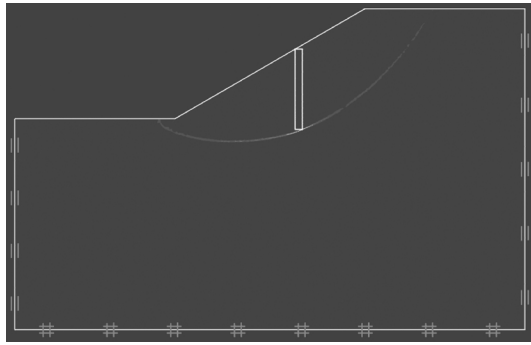


图11 最危险滑动面绕过抗滑桩底部

Fig.11 Critical failure surface bypassing anti-slide pile bottom

4 结论

本文基于有限元极限分析软件 OptumG2 建立边坡数值模型,并通过算例验证其合理性,进而探讨各参数对边坡稳定性的影响,得出以下结论:

1) 本文数值方法用以分析边坡稳定性是可行的,基于强度折减极限分析的安全系数偏于安全.数值分析得出的剪切耗散较大区域可视为最危险滑动面.

2) 粘聚力对安全系数随桩长及桩位变化规律的影响不明显.内摩擦角对抗滑桩加固效果的影响较大.内摩擦角较小时,抗滑桩对边坡的加固效果不明显,可尝试考虑其他加固方法;随着内摩擦角的增大,最优桩位逐渐由中部向中上部移动.

3) 桩长较小时,最优桩位靠近坡脚;桩长较长时,最优桩位处于边坡中部.当抗滑桩桩长较小时(0~10 m),安全系数基本未发生变化,随着桩长的增加,安全系数逐渐增大,但桩长达到一定程度时,继续增加桩长,安全系数将不再增加.

4) 当抗滑桩靠近坡顶或坡脚时,桩长对于安全系数的影响很小;当抗滑桩处于边坡中部时,桩长的变化对于安全系数的影响最为显著.尤其是边坡较陡时($\beta = 45^\circ$),靠近坡脚处抗滑桩的加固效果不明显.

5) 当桩长较小时,滑动面大多未穿过抗滑桩而是绕过抗滑桩底部;随着桩长的不断增大,最危险滑动面逐渐向边坡内部移动;最终,根据桩位的不同,将出现3种最危险滑动面情况.

参考文献

[1] 肖专文,张奇志,梁力,等.遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J].岩土工程学报,1998,20(1):44—46.

- XIAO Z W, ZHANG Q Z, LIANG L, *et al.* Application of genetic evolutionary algorithm for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (1):44—46. (In Chinese)
- [2] CAO J, ZAMAN M M. Analytical method for analysis of slope stability [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(5):439—449.
- [3] 王国强,吴道祥,刘洋,等.巢湖凤凰山滑坡形成机制和稳定性分析[J].岩土工程学报,2002,24(5):645—648.
WANG G Q, WU D X, LIU Y, *et al.* Analysis of the stability of mountain Phoenix Landslide in Chaohu city [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5):645—648. (In Chinese)
- [4] 马建勋,赖志生,蔡庆娥,等.基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2690—2693.
MA J X, LAI Z S, CAI Q E, *et al.* 3D FEM analysis of slope stability based on strength reduction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16):2690—2693. (In Chinese)
- [5] 郭明伟,李春光,王水林.基于有限元应力的三维边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2494—2500.
GUO M W, LI C G, WANG S L. Three-dimensional slope stability analysis based on finite element stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12):2494—2500. (In Chinese)
- [6] 周芬,郭奥飞,杜运兴.边坡稳定可靠度分析的新型四阶矩法[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):113—119.
ZHOU F, GUO A F, DU Y X. A new fourth-order moment method for slope stability reliability analysis [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(5):113—119. (In Chinese)
- [7] 李亮,李彦军,赵炼恒,等.土石混合边坡块石随机生成方法与稳定性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):170—178.
LI L, LI Y J, ZHAO L H, *et al.* Random generation method and stability analysis of earth-rock mixed slope block stone [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7):170—178. (In Chinese)
- [8] 戴自航,沈蒲生.抗滑桩内力计算悬臂桩法的改进[J].湖南大学学报(自然科学版),2003,30(3):81—85.
DAI Z H, SHEN P S. Improvements on calculation of internal forces of cantilever anti-sliding piles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2003, 30(3):81—85. (In Chinese)
- [9] 陈昌富,杜翠翠,张根宝.基于双参数法刚性抗滑桩嵌固深度可靠性设计[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(2):40—46.
CHEN C F, DU C C, ZHANG G B. Reliability design of the embedded depth of the rigid anti-slide piles based on bi-parameter method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2014, 41(2):40—46. (In Chinese)
- [10] 孙书伟,朱本珍,马惠民,等.微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(10):1564—1570.

- SUN S W, ZHU B Z, MA H M, *et al.* Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10):1564—1570. (In Chinese)
- [11] 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.
- DAI Z H, ZHANG X Y, ZOU S T, *et al.* Field modeling of laterally distributed landslide thrusts over anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10):1513—1518. (In Chinese)
- [12] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 悬臂式抗滑桩模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(10):2960—2966.
- LIU H J, MEN Y M, LI X C, *et al.* Study of model test on cantilever anti-slide pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10):2960—2966. (In Chinese)
- [13] 傅翔, 谢强, 张永兴, 等. 全埋式抗滑桩倾覆破坏的室内模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(8):2205—2211, 2218.
- FU X, XIE Q, ZHANG Y X, *et al.* Model experimental study of toppling failure of fully-embedded anti-sliding pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8):2205—2211, 2218. (In Chinese)
- [14] 章为民, 顾行文, 任国峰, 等. 刚性抗滑桩的桩土相互作用机理与极限阻滑力研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(10):86—94.
- ZHANG W M, GU X W, REN G F, *et al.* Pile-soil interaction mechanism and ultimate lateral load on rigid stabilizing pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10):86—94. (In Chinese)
- [15] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, 125(10):314—323.
- [16] AUSILIO E, CONTE E, DENTE G. Stability analysis of slopes reinforced with piles [J]. Computers & Geotechnics, 2001, 28(8):591—611.
- [17] 李家平, 赖允瑾, 李永盛, 等. 利用抗滑桩加固临水岸坡的边坡稳定性分析 [J]. 水利水运工程学报, 2005, 27(2):53—58.
- LI J P, LAI Y J, LI Y S, *et al.* Stabilization analysis of river-side slope reinforced by stabilizing piles [J]. Hydro-science and Engineering, 2005, 27(2):53—58. (In Chinese)
- [18] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆. 阻滑桩加固土坡稳定性分析与桩基的简化设计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19):29—35.
- NIAN T K, LUAN M T, YANG Q. Stability analysis of slopes with stabilizing piles and their simplified design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19):29—35. (In Chinese)
- [19] 梁冠亭, 陈昌富, 朱剑锋, 等. 基于 M-P 法的抗滑桩支护边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(2):451—456, 469.
- LIANG G T, CHEN C F, ZHU J F, *et al.* Stability analysis of pile stabilized slope based on Morgenstern-Price method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2):451—456, 469. (In Chinese)
- [20] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(6):950—954.
- LEI W J, ZHEN Y R, FENG X T. Analysis of pile location on landslide control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6):950—954. (In Chinese)
- [21] 李荣建, 于玉贞, 李广信. 抗滑桩加固非饱和土边坡三维稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(4):968—972.
- LI R J, YU Y Z, LI G X. 3D global stability analysis of unsaturated soil slope reinforced with piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):968—972. (In Chinese)
- [22] 胡新丽, 张永忠, 李长冬, 等. 库水位波动条件下不同桩位抗滑桩抗滑稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(12):3679—3684.
- HU X L, ZHANG Y Z, LI C D, *et al.* Anti-sliding stability of different pile positions under reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12):3679—3684. (In Chinese)
- [23] 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)
- [24] 王聪聪, 李江腾, 廖峻, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性分析及其优化 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1):231—237. (In Chinese)
- WANG C C, LI J T, LIAO J, *et al.* Stability analysis of slope reinforced with piles and optimization [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(1):231—237.
- [25] BISHOP A W. The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5(1):7—17.
- [26] HUANG S L, YAMASAKI K. Slope failure analysis using local minimum factor-of-safety approach [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 1993, 119(12):1974—1987.
- [27] HULL T S, POULOS H G. Discussion of “Design method for stabilization of slopes with piles” by T. S. Hull and H. G. Poulos [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(10):911—913.
- [28] LI R P, CAI A G, SHENG C G. Stability analysis of pile-slope interaction by finite element method [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, 27(5):396—401.
- [29] 年廷凯, 栾茂田, 杨庆, 等. 基于强度折减弹塑性有限元法的抗滑桩加固边坡稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2007, 28(S1):558—562.
- NIAN T K, LUAN M T, YANG Q, *et al.* Stability analysis of slope reinforced with piles by using strength reduction FEM [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1):558—562. (In Chinese)