

文章编号: 1007-2993(2022)03-0219-05

减重压脚法在欠稳定边坡治理工程中的应用

李世贵¹ 许倩²

(1. 湖北省鄂西地质工程勘察院, 湖北宜昌 443000; 2. 三峡大学, 湖北宜昌 443000)

【摘要】 边坡治理方法中, 减重压脚组合治理方法简单、施工方便、阻滑效果好, 应用广泛。合理的减重压脚治理方案不仅可以节约工程造价, 缩短工程周期, 而且可以达到永久治理的效果。以湖北省神农架林区某欠稳定边坡为例, 利用边坡稳定性分析与计算软件, 对减重压脚法进行了深入研究, 总结了不同条块数对边坡稳定性系数的影响规律, 并计算出边坡抗滑段和主滑段的分界线。在此基础上, 设计了四种减重压脚治理方案, 根据边坡体稳定性系数、滑动面前缘剩余下滑力的大小, 筛选出符合规范要求的方案, 对其性价比进行对比分析, 最终得出最优方案, 对类似边坡及滑坡治理工程具有一定的参考和借鉴意义。

【关键词】 边坡; 条块数; 减重压脚法; 稳定性系数; 剩余下滑力

【中图分类号】 P 642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.009

Application of Unloading and Pressure-foot Method in Treatment of Unstable Slope

Li Shigui¹ Xu Qian²

(1. E'xi Geological Engineering Investigation Institute of Hubei Province, Yichang 443000, Hubei, China;

2. China Three Gorges University, Yichang 443000, Hubei, China)

【Abstract】 There are many approaches for the treatment of slope, among which the combined treatment method of unloading and pressure-foot is simple, convenient and effective. Reasonable unloading and pressure-foot treatment scheme can not only greatly save project cost and shorten project period, but also achieve permanent treatment effect. Taking an unstable slope in Shennongjia Forestry District of Hubei Province as an example, the method of unloading and pressure-foot was applied based on stability analysis calculation software. The influence of different bar numbers on the stability coefficient of slope was summarized, and the boundary between the main sliding and the resistant section was calculated. Four kinds of unloading and pressure-foot treatment schemes were designed. According to the stability coefficient and the remaining sliding force, the scheme that meets the standards requirements is selected. The optimal scheme is obtained by comparing the cost-performance ratio. This method could provide reference for similar slope and landslide treatment engineering.

【Key words】 slope; bar numbers; unloading and pressure-foot method; stability coefficients; remaining sliding force

0 引言

我国经济飞速发展, 基础工程建设开始深入山区, 边坡治理工程量急剧增多, 范围和规模扩大, 边坡工程治理水平随之不断提高。目前, 边坡工程治理方法包括排水、刷方、减重、填土压脚、设置挡墙、岩石喷锚、格构锚固、抗滑桩等, 也可以将多种治理方法结合使用^[1-7]。刘海亭等^[1]采用“刷坡卸载+微型钢管桩”对某高边坡进行了治理, 使边坡的安全系数得到了明显提高; 卢乾等^[3]采用“覆盖层开挖+混凝土

贴坡挡墙+微型钢管桩+预应力锚杆”的边坡治理方案, 对水电站坝肩边坡进行了综合处理, 取得了良好的效果; 吴红刚等^[4]对山区高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构的协同工作性能进行了优化研究, 有效解决了任意断面剖切设计计算的困扰; 王浩等^[5]采用双排锚索抗滑桩治理超高路堑边坡, 成功对该边坡的关键施工步骤进行了主动控制。上述治理方法各有其优点, 也有其局限性。不合理的治理方案不仅会延误工期, 造成大量资金浪费, 严重者还会引发工程滑坡。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41807294); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB400)

作者简介: 李世贵, 男, 1985年生, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 工程师, 注册土木工程师(岩土), 研究方向为防灾减灾及防护工程。

E-mail: 546891311@qq.com

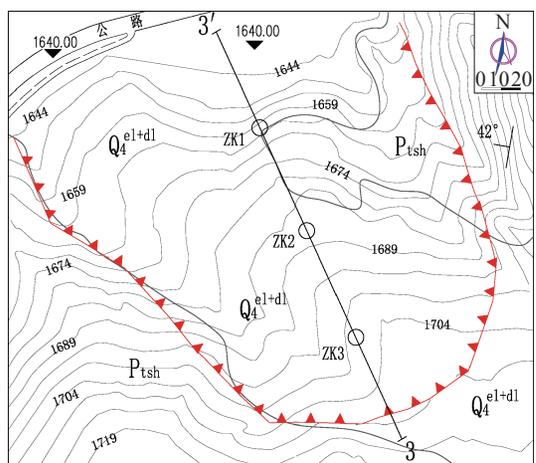
如刷方减重方法简单,施工方便,阻滑效果好,深受广大设计者们的青睐,但在实际工程中却出现很多在边坡前缘抗滑段刷方或者减重,误认为是因边坡坡率陡而不稳定,采用刷方减重放缓边坡坡率,结果反而削弱了边坡的抗滑力,进而引起边坡滑塌,教训十分深刻^[8]。

为研究边坡体减重压脚的组合治理效果,以湖北省神农架林区某欠稳定边坡为例,设计了四种减重压脚治理方案,采用数值模拟分析方法筛选最优方案,以期指导实际施工。

1 工程概况

该边坡位于湖北省神农架林区,属构造剥蚀中高山区,植被较发育,基岩局部裸露。该边坡在降雨期间,曾多次发生局部坍塌和滑移,现状处于欠稳定状态,在暴雨等特殊工况下,有可能发生整体滑移,危及下方居民的人身和财产安全。

边坡总体形态呈“舌”型,其后缘高程约 1715 m,前缘高程 1640 m,相对高差 75 m。边坡纵长约 230 m,宽度为 80~100 m,堆积体平均厚度约 21 m,体积约 $41.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,边坡潜在主滑方向 330° (见图 1)。



1-第四系残坡积; 2-神农架群地层; 3-变形边界; 4-岩层产状;
5-剖面线及编号; 6-钻孔及编号

图 1 边坡工程地质平面图

该边坡堆积体物质主要由第四系残坡积(Q_4^{el+dl})碎、砾石土组成,碎、砾石主要成分为白云岩、板岩等。粒径 5~100 mm,局部夹 200 mm 以上的块石和 2 m 左右的大孤石。碎、砾石多呈次棱角状,骨架颗粒部分接触,分布不均匀,其间为黏土和细颗粒充填。堆积体厚度在中部最厚,前部及后部稍薄,为潜在滑体。

软弱层为第四系残坡积(Q_4^{el+dl})砾石土,砾石成分为白云岩、板岩等,粒径 5~10 mm,多呈次棱角状;

土为粉质黏土,黏性强,多呈可塑状,土石质量比约为 5:5。本层砾石土覆盖于基岩之上,为软弱层,是不稳定边坡潜在滑动面,厚度 0~2.50 m,平均厚 1.40 m。基岩为神农架群(P_{tsh})白云岩,岩层产状为 $283^\circ \angle 42^\circ$ (见图 2)。

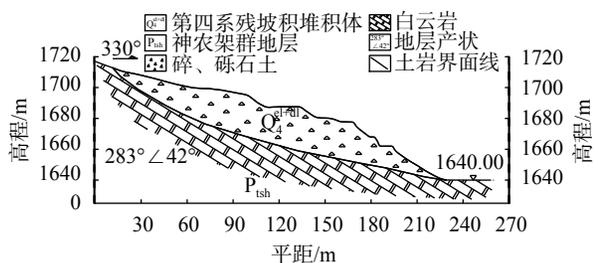


图 2 原边坡 3-3'工程地质剖面图

依据技术先进、施工便利、安全可靠及经济合理性等原则^[9],建议对该欠稳定边坡采用挖方减重+回填压脚+地表排水的综合措施进行治理。

2 原边坡稳定性分析

2.1 模型建立

选取该边坡沿主滑方向的主剖面 3-3'作为研究对象,运用南京库仑公司开发的 GEO5 软件中的土质边坡稳定分析模块,分别对该剖面建立天然/降雨工况下的稳定性分析模型,模型尺寸严格按照原剖面 3-3'绘制,分为堆积体、软弱层、基岩三个区域,采用条分法分别计算天然工况及降雨工况下边坡的稳定性。

2.2 计算参数

根据地勘成果以及反演分析结果,结合类似地质条件工程经验等综合分析,最终确定不稳定边坡的岩土计算参数(见表 1)。

表 1 物理力学计算参数法

坡体结构	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		黏聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	
	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态
堆积体	19.2	20.5	38	34	17	15
软弱层	19.2	19.9	36	30	16	13
基岩	26.0	26.4	500	480	40	38

2.3 条块划分

条分法是将边坡滑动土体竖直分成若干条块,并把各条块当成刚体,分别求作用在各条块上的力对圆心的滑动力矩和抗滑力矩,然后求边坡的稳定性系数^[10]。

由于条块数对边坡稳定性计算结果影响较大,不合理的条块划分会影响边坡治理方案设计的安全性和经济性^[11]。因此,有必要首先研究条块数对边坡稳定性产生的影响规律,进而获得比较合理的条块

划分。

依据文献 [9] 的条块划分顺序, 选用建筑边坡规范推荐的传递系数法(隐式解)^[9, 12] 求解, 并跟国际上通用的 Morgenstern-price 法^[8, 13] 做检核, 分别计算不同条块数下 3-3'剖面在天然/降雨工况时的稳定性系数(见表 2), 其与条块数间的关系曲线见图 3、图 4。

表 2 不同条块数下 3-3'剖面的稳定性系数

条块数	传递系数法		M-P法	
	天然工况	降雨工况	天然工况	降雨工况
8	1.286	1.051	1.282	1.048
9	1.280	1.045	1.276	1.043
10	1.276	1.040	1.272	1.038
11	1.272	1.036	1.268	1.034
12	1.269	1.034	1.265	1.032
13	1.265	1.030	1.262	1.028
14	1.265	1.031	1.262	1.030
15	1.265	1.031	1.262	1.030
16	1.263	1.028	1.260	1.027
17	1.263	1.028	1.260	1.027
18	1.260	1.025	1.257	1.024
19	1.260	1.025	1.257	1.024
20	1.259	1.024	1.256	1.023
21	1.259	1.024	1.256	1.023
22	1.259	1.024	1.256	1.023
23	1.258	1.024	1.256	1.023
24	1.258	1.024	1.256	1.023
25	1.258	1.024	1.256	1.023
26	1.258	1.024	1.256	1.023
27	1.258	1.024	1.256	1.023

从图 3、图 4 和表 2 可以看出: ①在天然/降雨工况下, 采用传递系数法计算得到的不同条块数下该边坡的稳定性系数的极差分别为 0.028、0.027, 采用 Morgenstern-price 法计算得到的不同条块数下该边坡的稳定性系数的极差分别为 0.026、0.025, 可见条块数的多少对边坡稳定性计算结果影响较大; ②传递系数法跟严格的 Morgenstern-Price 法计算结果比较接近, 随着条块数的增加, 边坡的稳定性系数呈现先快速下降后逐步趋于稳定的趋势; ③当条块数达到 20 个以上时, 边坡的稳定性系数基本趋于稳定。

由于边坡滑面为折线形滑面, 条块数太少会导致原始坡面和滑面失真, 使得滑面控制点处倾角变化大于 10°, 计算结果偏危险^[11]; 而条块数过多则会导

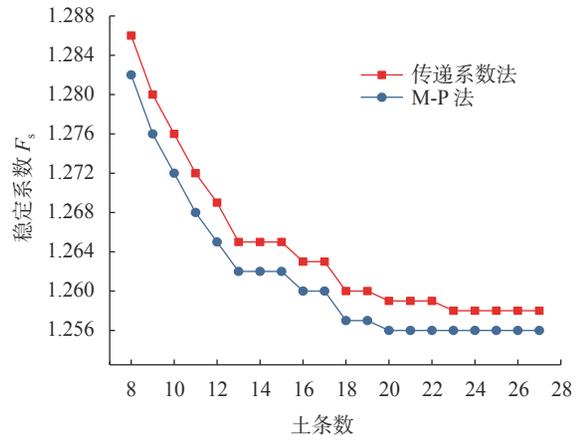


图 3 天然工况下边坡稳定系数-条块数关系曲线

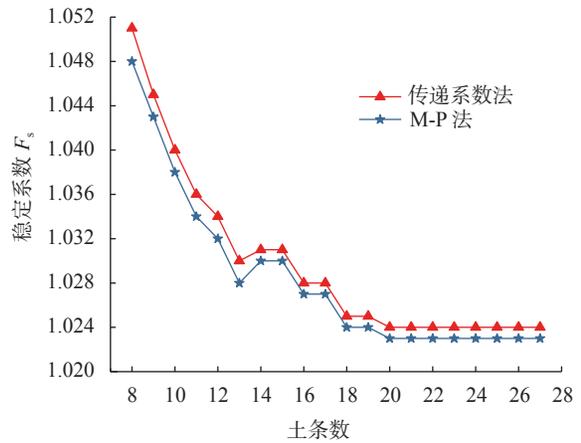


图 4 降雨工况下边坡稳定系数-条块数关系曲线

致模型更复杂, 计算量陡增。鉴于此, 所建模型条块数均取 23 个。

2.4 主滑段与抗滑段划分

该欠稳定边坡滑动面后缘陡, 前缘较平缓, 存在明显的抗滑段和主滑段。减重只能在边坡上部主滑段进行, 压脚只能在边坡前缘抗滑段及其以外回填土石, 如在边坡前缘抗滑段挖方或在中上部主滑段填方, 则进一步削弱了边坡的抗滑力或增加下滑力, 均不利于边坡的稳定。文献 [14-15] 采用 $G_i \sin \theta_i - \mu G_i \cos \theta_i > 0$ 来确定滑坡的主滑段, 此法忽略了黏聚力及条间力的作用。本文在边坡稳定性分析模型中, 提出采用传递系数法隐式解, 分别计算出天然工况及降雨工况下各条块的剩余下滑力 P_i 。如果 $P_{i+1} - P_i > 0$, 条块位于主滑段, 反之, 则位于抗滑段; 如果 $P_{i+1} - P_i = 0$, 条块位于抗滑段与主滑段的分界线上。

根据各条块剩余下滑力曲线(见图 5), 降雨工况下第 10 条块与第 11 条块的分界线为边坡抗滑段与主滑段的分界线; 天然工况下第 12 条块与第 13 条块的分界线为边坡抗滑段与主滑段的分界线(见图 6)。出于安全考虑, 建议取降雨工况下第 10 条块

与第11条块的分界线作为边坡抗滑段与主滑段的分界线。

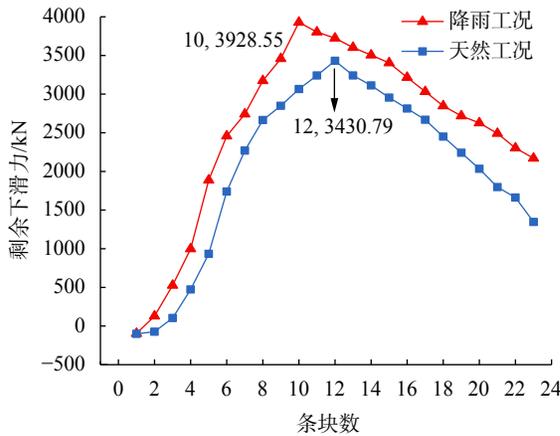


图5 边坡剩余下滑力-条块数关系曲线

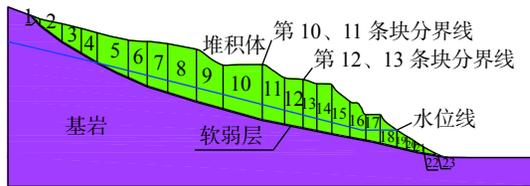


图6 抗滑段与主滑段分界计算结果图

3 减重压脚方案

减重压脚治理方案设计,首先要确定在哪个位置减,其次减多少方,以及如何压脚。本文根据边坡工程地质条件及上文计算成果,设计了四种方案(见图7)。方案一:在1—6条块所处位置挖方 244 m³,全部压在坡脚处;方案二:在1—9条块所处位置挖方 514 m³,全部压在坡脚处;方案三:在2—9条块所处位置挖方 518 m³,全部压在坡脚处;方案四:在2—9条块所处位置挖方 228 m³,全部压在坡脚处。

对以上四种方案分别建立天然/降雨工况下的稳定性分析模型,采用传递系数法计算出与之对应的边坡稳定性系数和滑动面前缘剩余下滑力。

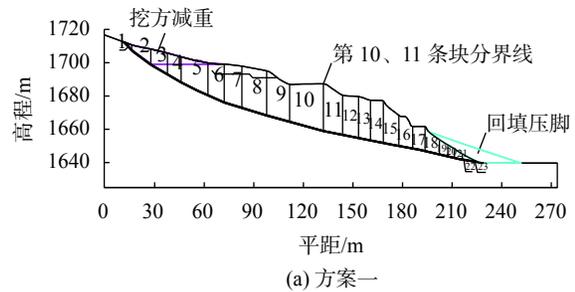
4 减重压脚治理效果评价

通过模拟四种边坡治理方案,从稳定性系数、滑动面前缘剩余下滑力及方案性价比三个方面,对模拟结果进行对比,从中选出最优方案。

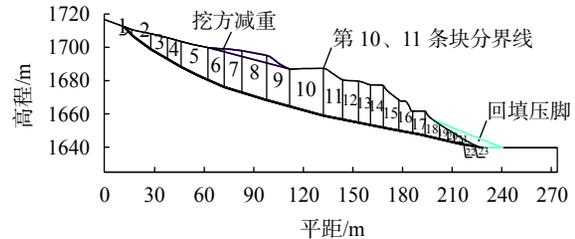
4.1 稳定性系数及前缘剩余下滑力

根据规范^[16]要求,治理后边坡的稳定性系数需达到 1.15 以上。将四种减重压脚方案的稳定性系数和滑动面前缘剩余下滑力计算结果与原剖面进行对比(见表3)。

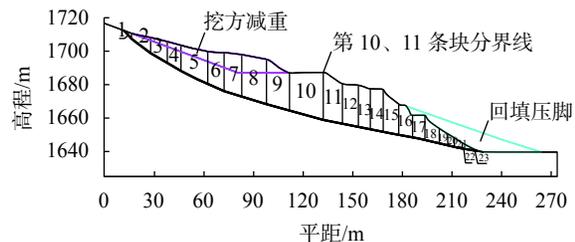
从表中可以看出,经四种方案治理后,边坡的稳定性系数均提高了。其中方案二和方案三治理效果较好,稳定性系数均满足了规范要求,相应的滑动面



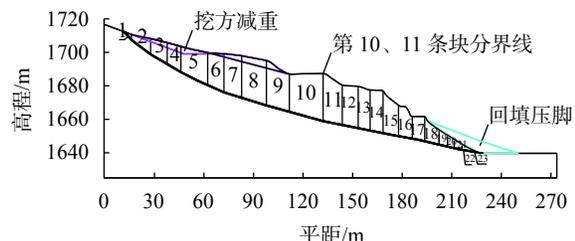
(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三



(d) 方案四

图7 减重压脚治理方案图

前缘剩余下滑力也降为了 0;而方案一和方案四在降雨工况下稳定系数均达不到规范要求,滑动面前缘仍存在剩余下滑力,尚需辅以其他支撑工程才能永久稳定边坡。

4.2 方案性价比型

由上述分析可得,边坡稳定性系数和剩余下滑力跟挖方减重方量及挖方部位关系较大。不合理的治理方案,挖方及回填总量多,稳定性系数提高的却少,造成了不必要的资金浪费,也延长了工期。本文对降雨工况下满足规范要求的方案二和方案三的性价比进行了对比分析,定义性价比 $W = \text{稳定性系数的增量} \Delta F_i / \text{总造价} S^{[14]}$,并设单宽每 m³挖方和填方的造价为 b 。计算结果(见表4)表明,方案二的性价比最高,应优先考虑。

表3 四种方案的边坡稳定性系数和剩余下滑力

方案编号	稳定性系数 F_s		剩余下滑力/kN	
	天然工况	降雨工况	天然工况	降雨工况
原剖面	1.258	1.024	1346.85	2170.81
方案一	1.399	1.144	0	84.18
方案二	1.507	1.234	0	0
方案三	1.477	1.210	0	0
方案四	1.368	1.118	0	510.26

表4 两种方案性价比计算表

方案编号	单宽挖方及填方量/ m^3	总造价 S /元	稳定性系数增量 ΔF_s	性价比 $W(10^{-4}/b)$
2	514	514b	0.210	4.09
3	518	518b	0.194	3.75

5 结论

通过折线形土质边坡实例,研究了不同条块数对边坡稳定性系数的影响规律,并对原边坡主剖面 3-3'进行了稳定性分析,得出了抗滑段和主滑段的分界线。在上述基础上,设计了四种减重压脚组合治理方案,分别从边坡体稳定性系数、滑动面前缘剩余下滑力、方案性价比三个方面综合评价了边坡的治理效果,并得出以下结论:

(1)条块数对该边坡稳定性计算结果影响较大,随着条块数的增加,边坡稳定性系数呈现先快速下降后逐步趋于稳定的变化趋势。

(2)边坡的剩余下滑力曲线可以快速、准确地划分出边坡的主滑段和抗滑段,进而确定挖方减重范围。

(3)通过对边坡体的稳定性系数、滑动面前缘剩余下滑力及治理方案性价比综合分析,合理、有效地调整治理方案,用较少的挖方量和回填量,获得较高的稳定性系数,不仅节约了工程造价,也缩短了工期。

(4)本文减重压脚治理方案整体设计思路可以应用到类似边坡及滑坡治理工程中,对其减重压脚位置的选择和确定具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] 刘海亭,张小辉,朱有禄,等.高边坡稳定性评价、加固

措施和监测分析[J].*岩土工程技术*,2020,34(2):76-80.

[2] 李红军.云南玉龙县宝山公路H1滑坡稳定性分析[J].*岩土工程技术*,2020,34(3):155-157,162.

[3] 卢乾,朱瑞晨,姜宏军,等.西部某水电站左岸坝肩边坡稳定分析及处理措施[J].*人民长江*,2019,50(S1):120-122.

[4] 吴红刚,牌立芳,赖天文,等.山区机场高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构协同工作性能优化研究[J].*岩石力学与工程学报*,2019,38(7):1498-1511.

[5] 王浩,王晓东,泮俊.超高路堑边坡治理工程案例研究II:治理对策及其过程控制[J].*岩石力学与工程学报*,2017,36(5):1152-1161.

[6] 叶晓明,刘汉龙,王振.长江三峡库岸水位消落带综合治理新思路探讨[J].*地下空间与工程学报*,2016,12(3):852-858.

[7] 化建新,郑建国,王笃礼,等.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[8] 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,2010.

[9] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[10] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学[M].北京:清华大学出版社,2013.

[11] 许泽坤,苏爱军.条分法中分条数对滑坡稳定性计算结果的影响[J].*安全与环境工程*,2019,26(1):133-140.

[12] 时卫民,郑颖人,唐伯明,等.边坡稳定不平衡推力法的精度分析及其使用条件[J].*岩土工程学报*,2004,26(3):313-317.

[13] WANG X, HU XL, LIU C, et al. Research on reservoir landslide thrust based on improved Morgenstern-Price method [J/OL]. *Journal of Earth Science*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.p.20210917.1158.002.html>

[14] 赵能浩,易庆林,胡大儒.基于数值模拟的滑坡削方回填治理效果分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,2015,26(1):31-36.

[15] 谷淡平,覃明彩,王启云.高边坡失稳分析及处理技术研究[J].*岩土工程界*,2009,12(10):52-56.

[16] DZ/T 0219—2006 滑坡防治工程设计与施工技术规范[M].北京:中国标准出版社,2006.

收稿日期:2020-11-23