

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.005

基于数值模拟的滑坡削方回填治理效果分析

赵能浩^{1,2}, 易庆林^{1,2,3}, 胡大儒¹

- (1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
3. 三峡大学湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 滑坡灾害的工程治理方法有很多, 每种治理措施在施工之前都需进行大量的模拟研究。本文以三峡库区某滑坡为载体, 针对削方减载、回填压脚的组合治理措施进行了较为深入的数值模拟研究。文中首先计算出原坡滑体主滑段与抗滑段分界线, 在此基础上, 设计了四种削方回填方案, 用数值模拟的方法预测其治理效果。先通过有限元法, 以一年为计算周期, 对原滑坡及四种方案分别进行瞬态渗流分析, 计算出相应的孔隙水压力, 然后再运用极限平衡法计算五种模型的稳定性系数, 并分析治理前后滑面相关参数。通过对比不同的方案, 从滑坡体稳定性系数、滑面有效正应力、滑面抗剪强度、方案性价比等四个方面评价了其治理效果, 为工程实践提供科学依据。

关键词: 滑坡; 削方回填; 数值模拟; 有限元法; 极限平衡法

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0031-06

A numerical modeling analysis on the cutting and filling control of a landslide in the Three Gorges area

ZHAO Nenghao^{1,2}, YI Qinglin^{1,2,3}, HU Daru¹

- (1. Ministry of Education Key Laboratory of Geological Disaster of Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei province, Yichang, Hubei 443002, China;
3. National Field Observation and Research Station of Landslides In Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: There are many measures for the engineering control of landslide, and each of them has to be done a lot of researches before applying into practice. Therefore, by the example of a landslide in the Three Gorges reservoir area, this text chooses to do a deep research on the combined engineering control measure of cutting and filling the landslide. Firstly, this text figures out the boundary between the main sliding and the resistant section of the original landslide, on which base, four cutting and filling projects are put forward. At first, the original landslide and the four projects are conducted the transient seepage analysis through the finite element method in a period of one year and then the pore water pressure is calculated. Secondly, this text works out the stability coefficient of five models in the limit equilibrium method and analyses the relevant parameters on the slip surface. Lastly, by comparing different projects, this text evaluates their control effect from four aspects, the stability coefficient, the effective normal stress, the shear strength and the cost-performance ratio, providing basis for the engineering practice.

Keywords: landslide; cutting and filling; numerical modeling; finite element method; limit equilibrium method

收稿日期: 2013-10-18; 修订日期: 2014-11-18

基金项目: 湖北省自然科学基金(2012FFB03804); 三峡大学土木与建筑学院 2014 年硕士创新基金(CX2014008)

第一作者: 赵能浩(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: zhaonh@foxmail.com

0 引言

目前滑坡工程治理措施较多,常用措施包括排水、削方减载、回填压脚、抗滑桩、预应力锚索、格构锚固、重力式挡土墙等,针对某一具体滑坡,也可以将多种治理措施进行搭配实施^[1-3]。每种治理措施都有其相应的适用条件,如预应力锚索工程适用于岩质滑坡和硬实的土质滑坡,对于土体较为松散的土质滑坡,则治理效果不太明显^[4]。又如削方减载、回填压脚工程,适用于滑坡体后部较陡而前部较缓的土质滑坡^[5]。在选中某种治理措施后,还须针对具体滑坡设计合理的施工方案,不合理的施工方案甚至会对滑坡的稳定性产生不利影响。

为了研究削方减载、回填压脚的组合治理效果,本文以三峡库区某滑坡为例,设计了四种削方回填方案,通过数值模拟的方法,分析了其治理效果。

1 滑坡概况

滑坡位于长江南岸,距三峡大坝坝址 56 km。该滑坡直接毁坏横穿滑坡体的沿江公路,威胁到长江的正常航运,滑坡产生的涌浪对其上、下游一定距离内的两岸居民与建筑设施构成重大安全隐患。

滑坡前缘剪出口高程在 120 ~ 130 m 一线。滑坡南北长约 500 m,东西宽约 430 m,滑体平均厚度 30 m,体积约 $645 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 20° ,属深层大型土质滑坡(图 1)^[6]。

该滑坡滑体主要由崩、坡积物及滑坡堆积物的碎石土组成,碎石、块石、角砾含量分布极不均匀,块径变化较大,一般 0.1 ~ 0.6 m。滑坡中心线前缘一带滑体厚度 29.90 ~ 38.50 m,中心线中部一带滑体厚度 18.50 ~ 22.90 m,中心线后缘一带滑体厚度 7.75 ~ 16.35 m。总体趋势是滑坡后部滑体厚度变小(图 2)。

滑坡滑带厚度大小不等,一般厚 0.20 ~ 1.30 m,平均厚度 0.7 m。滑带物质以含碎石或者含角砾粉质粘土为主。滑面形态,从纵向上看,中、后缘滑面坡度较陡,中、前部较平缓,中部滑面坡度介于前后两者间,为过渡带;呈后高前低、后陡前缓的折线状。滑床为侏罗系下统香溪组深灰色薄至中厚层粉砂岩夹薄层状泥岩、煤层,为单斜岩层,倾角 $33^\circ \sim 36^\circ$ 。

根据技术可行性、施工简便性、安全稳定性以及投资经济效益分析,建议在该滑坡的治理中采用削坡减载回填压脚的工程治理方案^[8]。

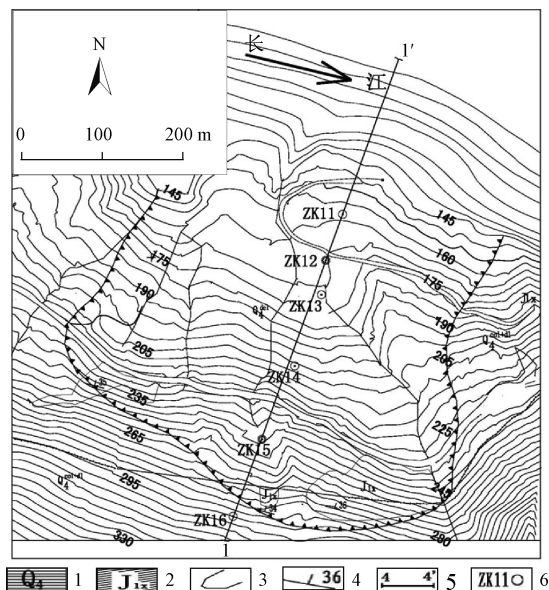


图 1 滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geomorphic map of landslide

1—第四系堆积物;2—侏罗系香溪组地层;3—滑坡边界;
4—岩层产状;5—剖面线及编号;6—钻孔及编号

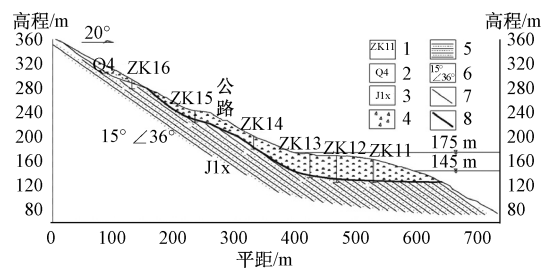


图 2 原滑坡 1—1' 工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of original landslide

1—钻孔及编号;2—第四系滑坡堆积体;3—侏罗系地层;
4—碎石土;5—粉砂岩;6—岩层产状;7—土岩界面线;8—滑面

2 模型建立

本文运用加拿大的 GeoStudio 系统软件中的 seep/w 程序和 slope/w 程序,分别对原滑坡 1—1' 剖面建立饱和/非饱和渗流分析模型和稳定性分析模型。

2.1 建模

模型大小及轮廓线严格按照原剖面 1—1' 绘制,分为滑体、滑带、滑床三个区域,共划分为 4426 个单元,4541 个节点(图 3)。瞬态渗流分析分为 50 个步时,模拟一年内滑坡体内的渗流场变化。

2.2 模型参数

本文模型计算中岩土体物理力学参数(表 1)的选取,是结合室内试验、原位试验及工程类比等方法,进

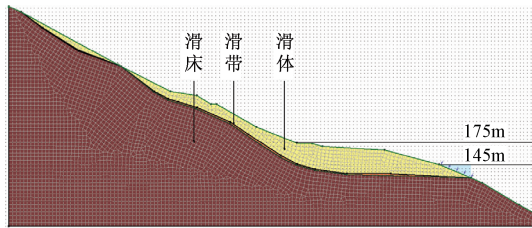


图 3 原滑坡 1—1'剖面数值模拟模型
Fig.3 Mathematical model of 1—1' profile
of original landslide

行综合取值的。

表 1 物理力学参数表

Table 1 The physical and mechanics parameters

滑坡结构	天然容重 γ / (kN/m^3)	饱和渗透系数 K_s / (m/d)	饱和体积含水量 W / (m^3/m^3)	抗剪强度	
				内聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / $(^\circ)$
滑体	20.0	0.08	0.041	27	17
滑带	18.6	0.04	0.041	12	15.5
滑床	25.0	0.02	0.052	300	40

2.3 边界条件

初始地下水位线由野外勘测资料获得。模型边界条件为:底部为隔水边界;在 175 m 水位以下变为水头边界,其边界函数为一年之内库水位的变化(图 4);库水位以上为潜在渗流边界^[7]。

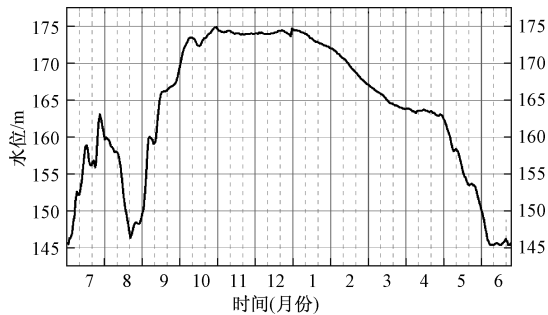


图 4 2012—2013 年三峡库区库水位变化图
Fig.4 Water level variation of Three Gorges reservoir area

3 原滑坡的稳定性分析

为了验证所建模型的合理性,以及为削方回填方案的设计提供依据,本文首先对原滑坡进行了稳定性模拟。通过模拟原滑坡体内一年之内的渗流场,计算其各时刻的孔隙水压力,然后以所得的孔隙水压力为初始条件,通过极限平衡法,计算出原滑坡相应时刻的稳定性系数。最后,在稳定性分析模型中,计算出了滑面主滑段与抗滑段的分界线。

3.1 稳定性系数

根据计算结果(图 5),该滑坡经过一年的库水位

运行之后,其稳定性系数降低了 0.0687,这与该滑坡近年来的累积位移不断增加的趋势是相符的^[8]。且该滑坡的稳定性随库水位的上升而增加,随库水位的下降而降低,在维持 175 m 高水位运行时,其稳定性也逐渐降低。一年之中,滑坡在 10 月底稳定性最高,在 6 月底稳定性最低,对应时刻的稳定性系数分别为 1.198 和 0.9343。以上对原滑坡模拟出的结果与理论分析是一致的^[9]。

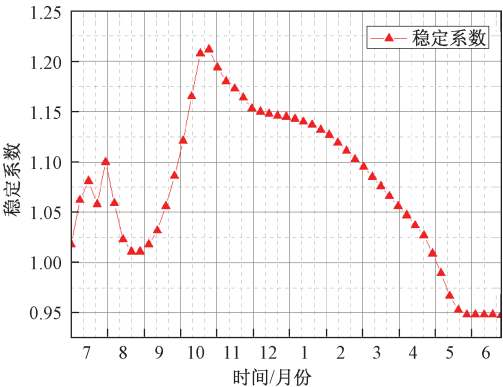


图 5 原滑坡一年内稳定性系数变化图
Fig.5 The stability variation of original landslide within a year

3.2 主滑段与抗滑段的分界面

对于变坡滑动面,往往同时存在主滑段和抗滑段。削方减载通常只能在主滑段进行,如果对抗滑段减载,对边坡的稳定是不利的。如果滑坡为圆弧滑动面,则可运用圆弧条分法和极限平衡理论来确定主滑段和抗滑段的分界面。如果 $G_i \sin \theta_i - \mu G_i \cos \theta_i > 0$,土条处于主滑段;如果 $G_i \sin \theta_i - \mu G_i \cos \theta_i = 0$,土条处于主滑段和抗滑段的分界面;如果 $G_i \sin \theta_i - \mu G_i \cos \theta_i < 0$,土条处于抗滑段^[10]。式中 G_i 为土条滑坡体自重, θ_i 为土条滑面切线与水平线夹角, μ 为滑动面的摩阻系数。

本文在滑坡稳定性模型中,运用条分法将滑体总共划分为 44 个条块(图 6)。按照上述理论,计算出第 21 条块与第 22 条块的分界线为主滑段与抗滑段的分界线(表 2)。由计算结果可知,该分界线距滑舌前端口 296.07 m,位于分界线后方的滑段为主滑段,前方

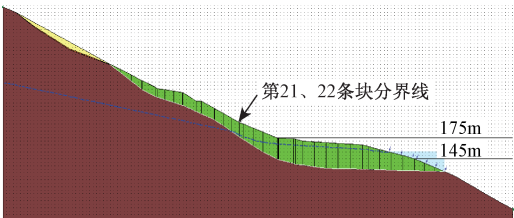


图 6 条分法计算结果图
Fig.6 Calculated result of slices method

为抗滑段。

表 2 主滑段与抗滑段分界线计算表

Table 2 The calculated result of boundary between main sliding and resistant section

条块号	摩阻系数 μ	$G_i \sin \theta_i / \text{kN}$	$G_i \cos \theta_i / \text{kN}$	$(G_i \sin \theta_i - \mu G_i \cos \theta_i) / \text{kN}$
21	0.277	1152.2	3946.7	57.78
22		641.79	2329.6	-4.21

4 削方回填方案

在制定滑坡削方回填的治理方案时,关键问题是:削多少方,在哪里削,填在哪里。位于该滑坡体上的水泥公路内侧,有较大体积的第四系堆积物,据上文计算结果,该处堆积物位于主滑段,且部分堆积物已沿滑床基岩滑落,剩余部分摇摇欲坠,对公路及过往车辆人员造成较大的安全隐患。因此提出削方减载、回填压脚等治理措施,消除滑坡隐患。

本文针对该滑坡提出了 4 种削方回填方案(图 7)。方案一:在水泥公路上方的滑坡体中削减 165 m^2 ,填在距滑舌前端 $119 \sim 219 \text{ m}$ 范围内。方案二:在水泥公路上方的滑坡体中削减 165 m^2 ,填在距滑舌前端 $56 \sim 119 \text{ m}$ 范围内。方案三:在水泥公路上方的滑坡体中削减 1220 m^2 ,填在距滑舌前端 $119 \sim 290 \text{ m}$ 范围内。方案四:在水泥公路上方的滑坡体中削减 1220 m^2 ,填在距滑舌前端 $44 \sim 219 \text{ m}$ 范围内。

按照滑坡原剖面 1—1' 的建模方法及步骤,分别对 4 种方案建立数学模型,并对应为模型 1、模型 2、模型 3、模型 4,原剖面 1—1' 对应为模型 0。此 5 种模型除削方回填处轮廓有差异外,其他所有条件均相同。

5 削方回填效果分析

区别于物理模型试验,数值模拟具有对复杂过程的定量计算和能够提供断面内任何位置的信息与试验结果等优势^[11]。基于此特点,本文从模拟治理之后滑坡的稳定性系数、滑面有效正应力、滑面抗剪强度、方案性价比等 4 个方面,对模拟的结果进行分析,从而更全面地评价该滑坡的治理效果。

5.1 稳定性系数

将 4 种方案的稳定性系数模拟结果与原剖面进行对比,很明显地看出,经过 4 种削方回填方案的治理之后,滑坡的稳定性均有不同程度上的提高(图 8)。其中方案四的治理效果最佳。经过方案四的治理之后,该滑坡一年内的稳定性系数最小值提高到

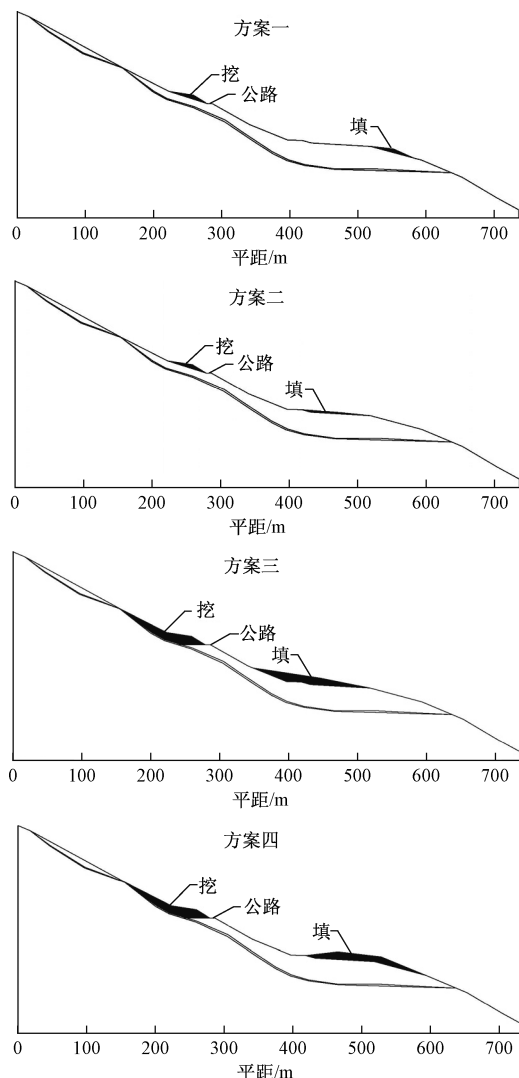


图 7 削方回填治理方案图

Fig. 7 The projects of cutting and filling on landslide

了 1.13; 稳定性系数大于或等于 1.05 的天数,由 187 天增至 365 天(表 3)。滑坡的稳定性得到了大幅度提高。

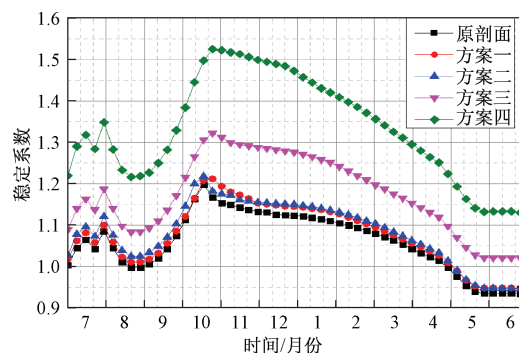


图 8 原滑坡及四种方案稳定性系数对比图

Fig. 8 The comparison of stability of five models

表 3 5 种模型稳定性系数综合对比表

Table 3 The comparison of stability of five models

模型号	最大值	最小值	平均值	≥1.15	≥1.05
0	1.198	0.9343	1.06	30 天	187 天
1	1.212	0.9477	1.077	52 天	235 天
2	1.218	0.9455	1.083	85 天	241 天
3	1.322	1.021	1.175	198 天	321 天
4	1.525	1.13	1.333	320 天	365 天

5.2 滑面有效正应力

极限平衡法计算边坡安全系数的结果依赖于滑面正应力分布的假设,故滑面正应力分布与滑坡的稳定性密切相关^[12]。根据有效应力原理,饱和土体内任一平面上受到的总应力可分为有效应力和孔隙水压力两部分,而土体的变形与强度的变化都只取决于有效应力的变化^[13]。因而研究滑面有效正应力的分布及变化情况,对滑坡的稳定性分析具有重要意义。

本文选取滑坡稳定系数最小时刻(即 6 月 30 号)为时间条件(下文 5.3 节亦采用该条件),将稳定性最好的方案四与原滑坡滑面有效正应力进行对比分析。根据计算结果(图 9),在滑坡后缘削方处,滑面有效正应力有所释放,但正应力释放的水平范围小于 35 m,对滑坡的稳定性不构成威胁。在滑坡前缘回填处,方案四在近 200 m 的水平范围内有效正应力曲线高于原剖面,最大差值达 199.4kPa。

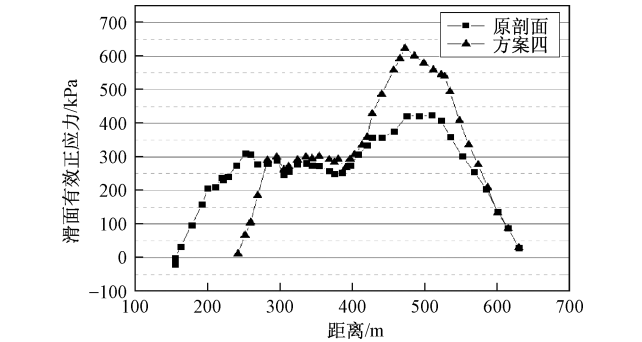


图 9 滑面有效正应力变化图

Fig.9 The effective normal stress change on slip surface

5.3 滑面抗剪强度

库伦抗剪强度公式 $\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi'$ 表明,在 c' 与 φ' 一定的条件下,抗剪强度与有效正应力呈线性关系^[15],故图 9 与图 10 的形状相同。从图 10 中原剖面的滑面抗剪强度曲线可知,平距在 400 ~ 550 m 范围内滑面岩土体的抗剪强度较高,为主要抗滑段,宜在此范围内进行回填。而方案四的挖方恰好回填到此范围内,滑面抗剪强度因此大幅度提高,其效果正好印证了这一观点。

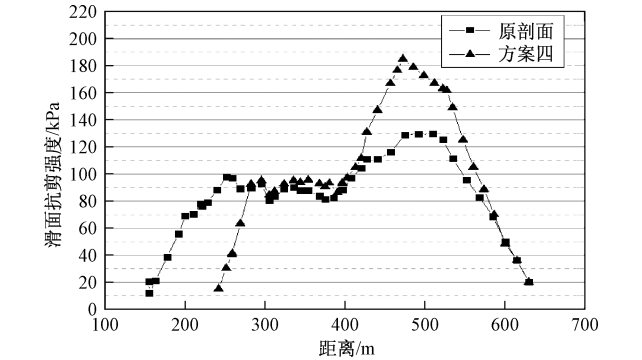


图 10 滑面抗剪强度变化图

Fig.10 The shear strength change on slip surface

5.4 治理效果性价比

由上文可知,削方量及回填量越多,滑坡的稳定性越高。但过多的挖方,必然产生过高的造价,导致资源和财力的浪费。鉴于此,本文提出了治理效果的性价比,将其定义为:平均稳定性系数的增量 ΔF_s 与总造价 W 的比值,用 k 表示,即 $k = \Delta F_s / W$ 。设每立方的开挖和回填的总价格为 a ,且假定为单宽开挖及回填。根据计算结果(表 4),方案四的治理效果性价比最高,在工程实践中可优先选择,而方案三的稳定性虽高于方案一和方案二,但其性价比反而较低。

表 4 4 种方案治理效果的性价比计算表

Table 4 The cost-performance ratio of four projects

方案	单宽开挖及回填量/ m^3	总造价 W /元	平均稳定系数增量 ΔF_s	性价比 $k/(10^{-4}/a)$
1	330	330 a	0.017	1.03
2	330	330 a	0.023	1.39
3	2440	2440 a	0.115	0.94
4	2440	2440 a	0.273	2.24

6 结论

本文通过对原滑坡及 4 种削方回填方案的数值模拟,先后对滑坡体进行渗流分析和稳定性分析,得出了原滑坡在一年之内的稳定性现状,并计算出了主滑段与抗滑段的分界线。在此基础之上,设计了四种削方回填的方案,并分别进行了数值模拟分析,从滑坡体稳定性系数、滑面有效正应力、滑面抗剪强度、方案性价比等 4 个方面阐述了滑坡的治理效果,得出如下结论:

(1)削方回填组合治理措施适用于前缘较缓且后缘较陡的推移式土质滑坡,宜在靠近后缘主滑段削方,在靠近前缘的抗滑段回填。

(2)在滑坡后缘削方减载处,局部范围内会出现应力释放情况,但影响范围较小,对滑坡的整体稳定性

不构成威胁。

(3) 削方量及回填量越大, 滑坡稳定性越高, 但在考虑方案性价比条件下, 削方回填量与治理效果的性价比并非呈正相关关系。

参考文献:

- [1] 徐开祥, 黄学斌, 付小林, 等. 滑坡及危岩(崩塌)防治工程措施选择与工程设置[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 134-138.
XU Kaixiang, HUANG Xuebin, FU Xiaolin, et al. Selection of control engineering measures and installation for landslide and dangerous rockbody[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(4): 134-138.
- [2] 刘传正, 李瑞敏, 李铁锋, 等. 三峡库区白衣庵滑坡防治工程研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 51-57.
LIU Chuazheng, LI Ruimin, LI Tiefeng, et al. Study on Baiyi an landslide control engineering in the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 51-57.
- [3] 穆鹏, 吴玮江, 王思长, 等. 兰州石峡口滑坡治理工程效果分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 89-91.
MU Peng, WU Weijiang, WANG Sichang, et al. An analysis of treatment effect for the Shixiakou landslide in Lanzhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 87-91.
- [4] 韩西平. 滑坡治理方法及工程实例分析[J]. 地下水, 2010, 32(6): 134-135.
HAN Xiping. Landslide treatment methods and engineering example analysis[J]. Ground Water, 2010, 32(6): 134-135.
- [5] 方庆银, 李文洲, 王洪恩. 滑坡工程治理程序及方法浅析[J]. 华南地质与矿产, 2009(3): 72-76.
FANG Qingyin, LI Wenzhou, WANG Hongen. The prevention procedure and method of landslide: a preliminary analysis[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2009(3): 72-76.
- [6] 易武, 涂国保, 卢书强, 等. 湖北省三峡库区后续地质灾害防治秭归县白水河滑坡应急治理工程勘察报告[R]. 2013.
YI Wu, TU Guobao, LU Shuqiang, et al. The Three Gorges Reservoir area in Hubei province subsequent geological disaster prevention and control of Zigui county emergency management project of the white river landslide survey report[R]. 2013.
- [7] 张桂荣, 程伟. 降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 476-482.
ZHANG Guirong, CHENG Wei. Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui county under the associative action of reservoir water level fluctuations and rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 476-482.
- [8] 田正国, 程温鸣, 卢书强. 三峡库区滑坡崩塌发育的控制与诱发因素分析[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(1): 50-55.
TIAN Zhengguo, CHENG Wenming, LU Shuqiang. Control and triggering factors analysis of landslides and rockfalls in the Three Gorges Reservoir area[J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(1): 50-55.
- [9] 王尚庆, 徐进军, 罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报, 2009, 34(10): 1218-1221.
WANG Shangqing, XU Jinjun, LUO Mian. Study on warning of dangerous state of Baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(10): 1218-1221.
- [10] 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.
GU Danping, QING Mingcai, WANG Qiyun. High slope instability analysis and processing technology research[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(10): 52-56.
- [11] 秦凯旭, 冯文凯, 郎秋玲. GEO-SLOPE 软件在某滑坡稳定性计算中的应用[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 21-24.
QIN Kaixu, FENG Wenkai, LANG Qiuling. Application of geoslope software in calculation of landslide stability[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(2): 21-24.
- [12] 刘华丽, 朱大勇, 钱七虎, 等. 滑面正应力分布对边坡安全系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1323-1330.
LIU Huali, ZHU Dayong, QIAN Qihu, et al. Effect of normal stress distribution on factor of safety of a slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1323-1330.
- [13] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.