

潘苏锋, 黄海燕, 徐康, 等. 强降雨作用下金场坝水库边坡稳定性分析与治理评价[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 164–170. [PAN Sufeng, HUANG Haiyan, XU Kang, et al. Stability Analysis and Treatment Evaluation of Jinchangba Reservoir Slope under Heavy Rainfall[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 164–170]

强降雨作用下金场坝水库边坡稳定性分析与治理评价

潘苏锋¹, 黄海燕¹, 徐 康², 张慧颖¹

(1. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘要: 以 FLAC3D 数值模拟计算为主要研究手段, 基于结构动力学非线性有限元理论, 结合某水库左岸边坡实例, 对强降雨作用下滑坡体应力、位移、塑性区域进行研究, 以及采用混合抗滑措施后的加固效果进行评价。结果表明: 强降雨作用下, 滑坡体内部主要以压应力为主, 不存在拉应力; 滑坡产生的最大竖向位移位于滑坡体的中下部; 塑性区域面积存在集中现象贯穿滑坡体内部, 滑坡处于不稳定状态。加固处理后, 滑坡产生的最大竖向位移相比设抗滑装置前滑坡滑动位移量明显减小, 塑性区域的面积减少, 滑坡整体处于稳定状态, 治理效果明显。

关键词: 数值模拟; 强降雨; 稳定

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0164-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.23

Stability Analysis and Treatment Evaluation of Jinchangba Reservoir Slope under Heavy Rainfall

PAN Sufeng¹, HUANG Haiyan¹, XU Kang², ZHANG Huiying¹

(1. College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: With numerical simulation calculation as the main research method, combined with an example of the left bank slope of Jinchangba reservoir, the stress, displacement and plastic area of the landslide body under heavy rainfall are studied, and the reinforcement effect after adopting mixed anti-sliding measures is evaluated. The results show that: under the action of heavy rainfall, the interior of the landslide body is mainly composed of compressive stress, and there is no tensile stress; the maximum vertical displacement generated by the landslide is located in the middle and lower parts of the landslide body; there is a concentration phenomenon in the area of the plastic zone running through the interior of the landslide body, and the landslide

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501105); 云南省教育厅科学研究基金(2019J0131); 第十三届学生科技创新创业行动基金(2020ZKY376, 2020ZKY363, 2020ZKY367)联合资助

作者简介: 潘苏锋(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为边坡稳定性研究。

E-mail: 1651958072@qq.com

通信作者: 黄海燕(1975-), 男, 教授, 博士, 主要从事工程安全研究。

E-mail: 2776830047@qq.com

is in an unstable state. After the reinforcement treatment, the maximum vertical displacement of the landslide is significantly reduced compared with the sliding displacement of the landslide before the anti-skid device is installed, the area of the plastic zone is reduced, the landslide is in a stable state as a whole, and the treatment effect is obvious.

Keywords: Numerical simulation; Heavy rainfall; Stability

0 引言

降雨是很多滑坡甚至大型滑坡的直接诱发因素,尤其是强降雨引发的滑坡,频度最高^[1]。中国南方雨水充足降雨时间长,这种条件为滑坡的形成提供了潜在条件。2008年北川县持续不断地强降雨造成多处山体产生滑坡,导致老县城一半以上被土体掩埋,造成了重大的经济损失。2013—2014年,凯羊高速公路在施工过程中,因降雨等因素先后诱发多次滑坡变形,引起二级大型滑坡。如何对降雨丰富的地区进行滑坡防治,对于研究人员来说既是难点也是热点,朱蕾等^[2]以白家包滑坡为例采用数值模拟方法,得出降雨与库水位升降组合作用,水位下降速率越大,滑坡变形程度越大。孙云龙等^[3]基于赤水河谷旅游公路 K93+203~K93+496 段在施工过程中发生的降雨诱发型滑坡,解释了边坡稳定性系数与强降雨时间有一定相关性,边坡失稳发生在不透水边界上。李光明等^[4]利用 Flac3D 软件研究滑坡加载前后边坡应力位移变化影响,并给出“应急工程先行,防止恶化;永久治理,不留后患”的加固处理方式,结果良好。王建洪等^[5]以及丽江、香格里拉气象站的典型降雨历史数据分析,研究了滑坡与降雨之间的关系,提出了多值型和单值型两种降雨模式。张社荣等^[6]基于 ABAQUS 软件实现渗流与应力耦合作用下的破坏接近度(FAI)评价方法,多角度综合探究强降雨特性对边坡失稳机制及稳定性的影响。汪磊等^[7]采用 GeoStudio 数值模拟软件对不同的降雨条件和坡体初始水位进行模拟得出强降雨和瞬态承压水的产生和发展对堆积层滑坡的产生有重要的影响作用,降低了坡体的稳定性。目前,对强降雨作用下混合抗滑措施是否有效可行、是否可以进一步优化问题还不能有效判断。因此本文结合现有研究成果,以某水库边坡为研究对象,利用 FLAC3D 有限元数值模拟计算软件对强降雨作用下滑坡稳定性以及设置抗滑装置后的加固效果进行数值模拟研究,为水库后续的安全运行和其他类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 地形地貌

某水库,控制流域径流面积 6.6 km²,总库容为 365.62 万立方米。坝址分山岭最高 2122.30~2054.88 m,河床高程 1688~1723 m,河床及阶地宽约 4.20~4.50 m。左岸地形坡度为 30°~45°,1729.43 m 高程以上地形坡度 15°~25°。滑坡区域岩层倾向北西,倾角 20°~40°,为单斜岩层。地层连续性好,岩层产状基本稳定。左岸岩层产状 245°∠35°~40°,坡向 206°,岩层倾向与边坡倾向斜交,交角 39°,属斜向顺向坡,岩层倾向左岸偏下游。

滑坡区域出露地层的岩性为第四系残坡积(Qel+dl),为褐黄色粉质粘土、粘土夹碎石,为分布于冲沟及河床两岸宽缓山坡;主要分布于两岸地势较陡处。第四系冲洪积(Qal+pl)卵砾石土,为灰褐色砂、卵、砾石夹漂石,砂粒充填,中密,厚度 1.20~1.80 m,分布于两岸支流冲沟及主河床。前奥陶系澜沧群九道河组(Anoj3)大理岩、灰岩,为该区的隐伏岩体,在切割较深的河床底部,零星小面积出露。

1.2 水文地质

研究区域地下水类型为第四系松散岩类孔隙水及基岩裂隙水。第四系孔隙含水层分布于两岸山坡中上部,厚度较薄,中等透水。基岩裂隙水层分布于主河床及两岸一级阶地、各支流冲沟,厚度 1.2~1.8 m,强—中等透水,富水性中等—强。地下水受大气降水补给,经第四系孔隙含水层,基岩裂隙含水层,向河床及两岸冲沟,支流排泄。基岩岩体比较完整,岩体透水性弱,降雨形成的地下水主要以径流的形式在基岩表面流动。

研究区域处于中亚热带低纬山地季风气候区,具有冬春干燥、夏秋湿润、冬无严寒、夏无酷暑、干湿季分明的气候特点,多年平均降水量 1603 mm,最大降雨量为 1834.2 mm,最小年降雨量为 1459.3 mm。每年 5 月初进入雨季,到 10 月中旬,其中 5~10 月的降雨量占了全年雨量的 87%。年平

均降雨天数不少于 220.4 d, 日降雨量大于 6 mm 的天数为 57.2 d, 暴雨天为 10 d, 大暴雨天为 2 d, 最大日降雨量 119.8 mm。根据当地统计的降雨资料, 将降雨强度分为小雨、中雨、暴雨三个阶段, 降雨强度分别为 12 mm/d、23 mm/d、107 mm/d, 由于本文研究强降雨条件下水库边坡稳定性, 因此降雨强度取值 107 mm/d 进行分析。

2 数值模拟结果分析

2.1 模型建立

模型依据水库左岸边坡工程的地质图, 通过软件建成三维模型, 通过对该边坡表层土体相关参数与降雨入渗深度的研究, 对土层含水率变化产生影响的最大入渗深度是 2 m, 所以将边坡表层土体分为三层, 表层土体 0~1 m 为第一层, 该层土体为降雨接触砂土层, 表层土体 1~2 m 为第二层, 该层土体 1~1.8 m 为入渗砂土层, 1.8~2 m 为入渗粘土层; 其他边坡土体分层按照天然工况边坡土体进行分层, 同时对模型进行网格划分, 共划分单元 37 491 个, 网格节点 8063 个, 具体计算模型见图 1。

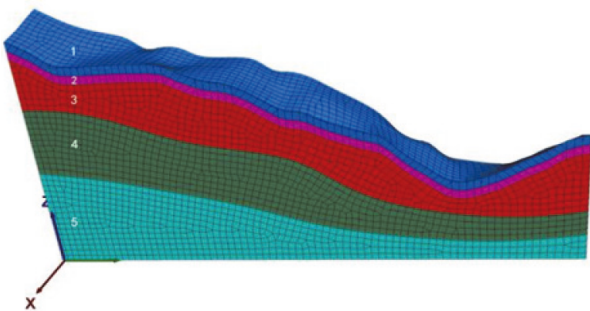


图 1 边坡数值计算三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model of slope numerical calculation

2.2 参数条件取值

随着降雨量及降雨强度不断增加, 雨水沿坡面渗入坡体内导致岩土体颗粒饱和度增大, 一方面土体含水率变大使得坡体自重增加, 导致坡体发生产生向下滑移; 另一方面边坡土体滑面因雨水浸泡土体颗粒的内摩擦力以及粘聚力等导致物理参数不断降低, 从而使得边坡土体的抗剪强度不断减小, 所以通过以上分析本次数值模拟将降雨工况下的数值模型简化, 采用折减表层土体粘聚力(c)以及内摩擦角(φ)的方式来建立降雨强度

不断增大的边坡模型。通过实验得到折减后边坡表层土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 强降雨强度和持时条件下土层参数
Table 1 Soil parameters under the intensity and duration of heavy rainfall

土层编号	体积模量 $G/(\text{Gpa})$	剪切模量 $K/(\text{Gpa})$	重度/ (kN/m^3)	粘聚力 $c/(\text{kpa})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 ν
1	0.0167	0.0077	14.7	1.2	21	0.32
2	0.0169	0.0081	14.7	1.9	24	0.32
3	0.067	0.0152	16.75	5	25	0.57
4	0.13	0.0286	19.5	50	29	0.2
5	4.3	8.8	23	3000	36	0.15

2.3 边界条件设置

根据边坡的实际情况对其边界条件进行合理的简化, 以达到合理且便捷的目的。根据本次分析降雨工况下的稳定性分析, 将水库模型施加不透水边界条件, 通过在模型的四周施加法向位移约束, 在模型底部施加竖向位移约束。

2.4 结果分析

图 2、图 3 是边坡在强暴雨条件下最大主应力和最小主应力分布图, 根据模拟图 2、图 3 可知, 边坡在强降雨条件下坡体内部应力均处于负值, 由此可以反应内部不存在拉应力, 第一主应力最大为负 3.8 MPa, 第三主应力最大为负 2.1 MPa, 最大应力主要集中在底部和中部小范围区域。应力的整体变化相对而言比较均匀, 小部分出现应力的突变很大可能是这部分的土体处在土层交界处雨水的浸泡下变得松散, 在没有支护措施下容易产生位移。

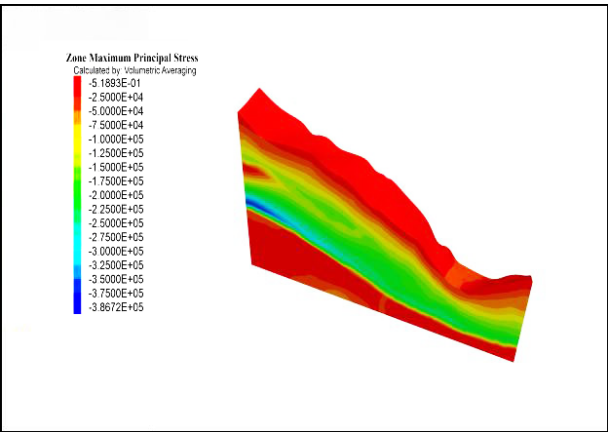


图 2 边坡最大主应力分布图

Fig.2 Distribution map of maximum principal stress of slope

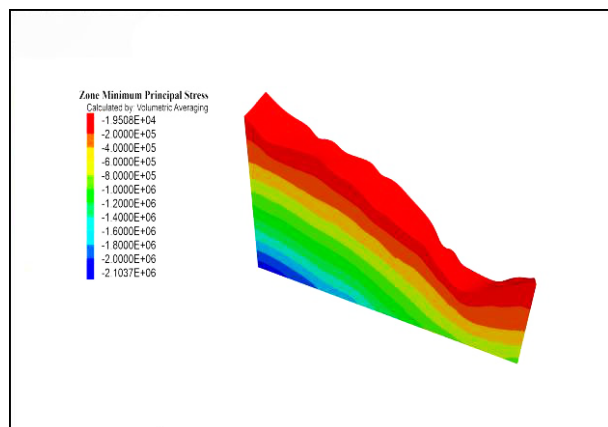


图3 边坡最小主应力分布图

Fig.3 Distribution map of the the minimum principal stress of slope

图4是边坡在强降雨条件下Z方向位移分布图,最大位移为0.28 m,此时的安全系数为1.08。最大位移主要分布边坡的中部,并且位移随边坡深度的变化而变小,由坡体内部向坡面的位移出现了很大幅度的增加,位移变化总趋势是由内向外逐渐增大。这说明在降雨过程中,边坡内部出现破坏的机率低于表层,表面土体出现破坏滑移状态情况会逐渐引起内部变化从而导致整体稳定性下降。图5是强降雨条件下边坡塑性区分布图,表明水库左岸边坡表层土体塑性区域不断增多,塑性面积存在集中现象,贯穿滑坡体内部,主要集中在边坡中部偏下区域,且出现零星拉张的区域。

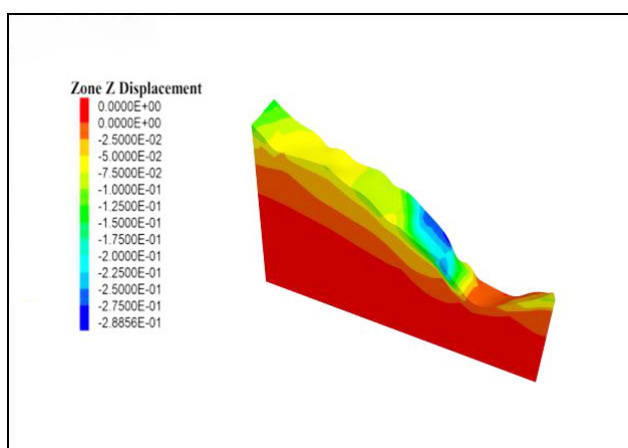


图4 Z向位移云图

Fig.4 Z-direction displacement cloud map

通过数值分析可以看出,在降雨渗流作用下,边坡体内的渗流强度不断加强,导致边坡土体孔隙水压力增大以至于有效应力不断减小,使得边坡岩土体可塑性不断增强。同时由于强降雨作用,大量无法渗透进边坡土体的雨水在坡体表层会形

成地表径流,由于径流在边坡表面对护坡物质的冲刷作用,导致边坡表面发生破坏,从而促进了雨水的渗透强度,加速边坡的变形破坏。

综上所述,工程区的滑坡体处于失稳状态。在旱雨季分明的气候条件下,滑体岩土在旱季失水,表层孔隙、裂隙张开;在雨季因强降雨造成雨水沿孔隙、裂隙下渗,使滑体岩土饱水或含水量增大,致使滑体重量加大,下滑力增大,从而激发滑坡的形成。所以对该滑坡进行加固处理就显得很重要。

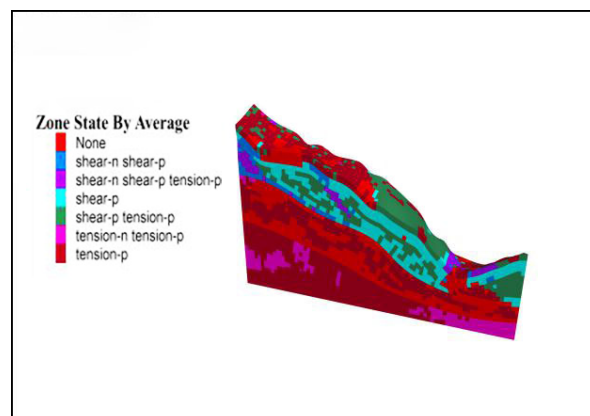


图5 强降雨条件下塑性区分布图

Fig.5 Distribution map of plastic zones under heavy rainfall

3 加固措施

边坡加固实质上是改变边坡的力学平衡条件,通过增大边坡的抗滑力和减少边坡的下滑力,来提高边坡的稳定性^[8]。对于边坡加固的处理方式大致上分为直接加固法和间接加固法。直接加固法主要有挡墙、抗滑桩、锚索等,间接加固法主要有放缓边坡、注浆加固、防排水工程等^[9-10]。在顺层岩质边坡加固设计中,常常采取两种或多种加固方法混合使用,以确保边坡在建设期和运营期处于稳定状态。

通过对强降雨条件下边坡稳定性的相关分析后发现该处边坡容易在表层土体发生滑移,土层交界处容易发生移动,特对该左岸边坡制定以下加固处理措施,对于浅层地表使用土钉加固,长度3 m,共布设土钉22根;深层土体使用锚杆加固,共布设锚杆13根,长度为30 m;同时表层土体使用不透水混凝土喷护加固。具体加固模型如图6。

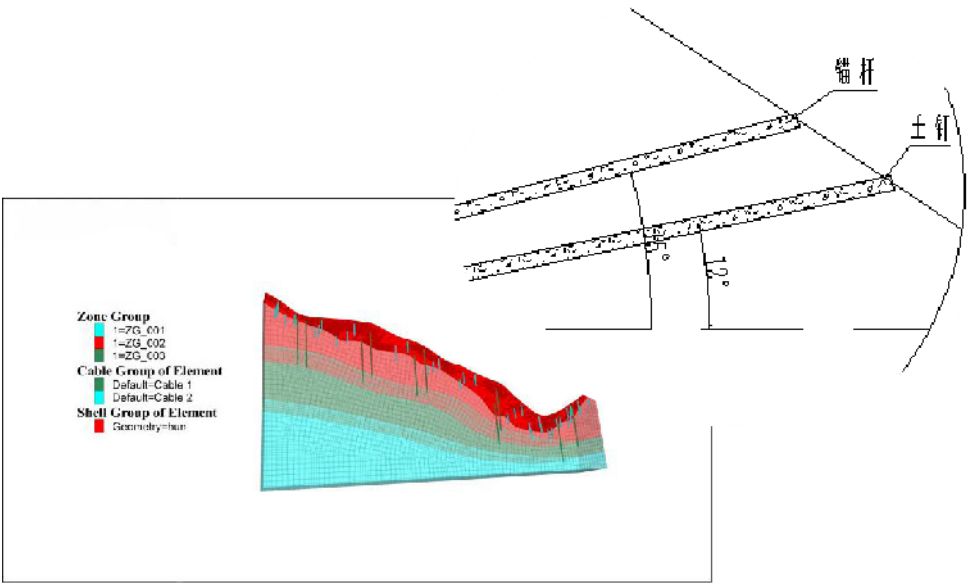


图 6 边坡加固模型图
Fig.6 Slope reinforcement model

根据规范要求，在边坡土体表层喷混凝土其强度一般工程不得低于 c15，重要工程不低于 c20，在此选取喷射混凝土 c20 喷射于边坡表面进行防

护^[11-12]。土层参数见表 1，同时结合相应的参考文献，锚杆、土钉及混凝土单元参数取值见表 2。

表 2 锚杆等参数取值
Table 2 Values of anchor rod and other parameters

类型	弹性模量 E/Gpa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗拉强度/ Kpa	浆体内摩擦角/ ($^{\circ}$)	浆体法向刚度/ Mpa	浆体粘聚力/ Kpa
土钉	210	0.3	7800	210	/	/	/
混凝土(C20)	25.5	0.2	2500	/	25	17.5	45
锚杆	210	0.25	7800	210	/	/	/

4 加固后稳定性分析

图 7 是加固处理后最大主应力图，加固后边坡的内部应力分布明显变得复杂，主要因为加固措施改变了原有的应力场分布。图 8 是加固后边坡最小主应力图，可以看出加固措施对最小主应力的影响不是很明显。同加固前相比，边坡内部均没有拉应力出现，基本上都是压应力为主。

图 9 可以明显看出加固后位移的分布变得均匀，并且明显有所减小。最大位移量降低为 0.07 m 这种变化主要是因为抗滑装置在内部相对于土体产生滑移，抗滑装置为了抵抗滑移产生了抵抗力，从而进一步影响土体内部应力的分布，土体内部的应力重分布使得土体位移受到限制，土体处于一个相对稳定的状态，此时的安全系数变为 1.11，

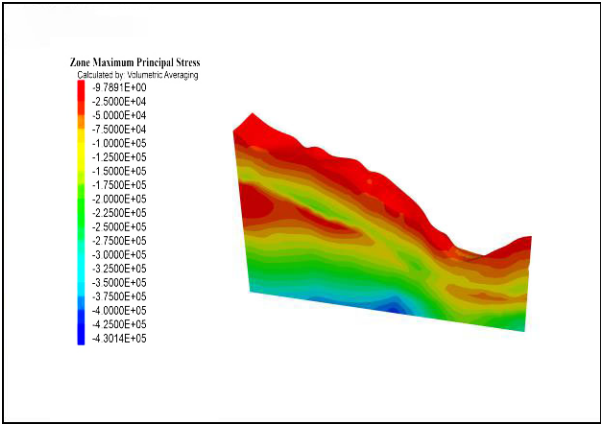


图 7 加固后最大主应力图
Fig.7 The maximum principal stress diagram after reinforcement

说明治理措施起到了加固的作用。由图 10 可以知道加固后塑性区域变得比较均匀,有效的减少塑性区域贯穿坡体内部,塑性区主要集中在边坡表层中部及中部偏下区域,边坡表层塑性零星扩张

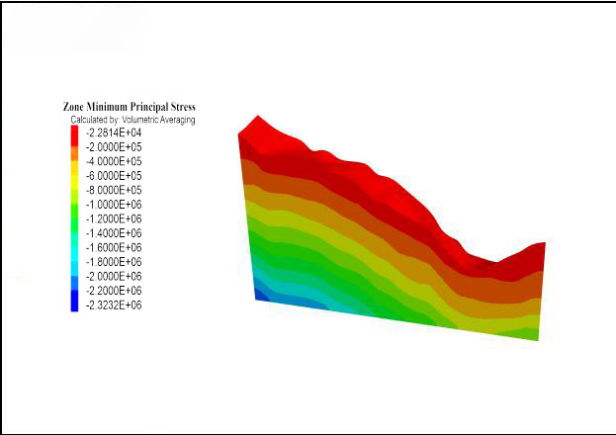


图 8 加固后最小主应力图

Fig.8 The minimum principal stress diagram after reinforcement

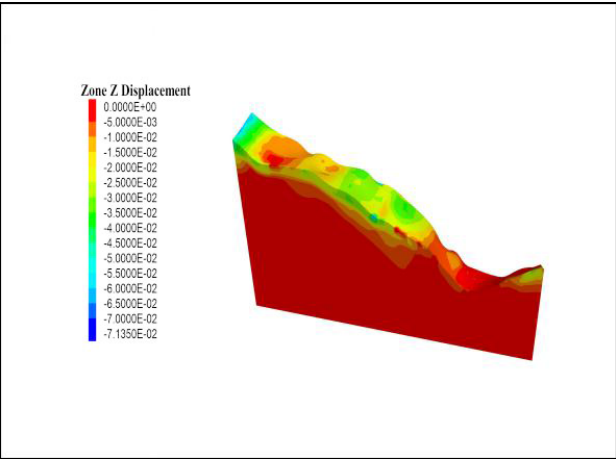
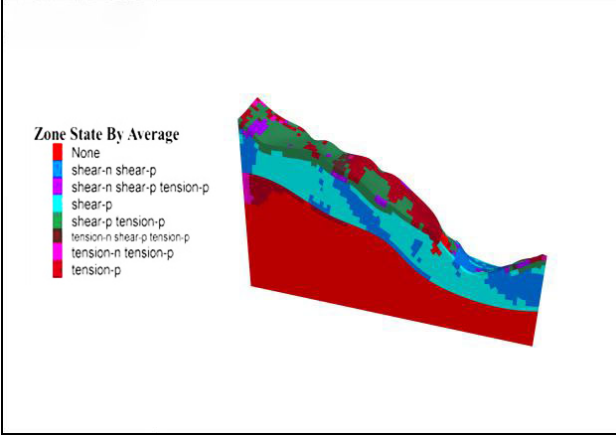


图 9 加固后 Z 向位移图

Fig.9 Z-direction displacement after reinforcement



10 加固后塑性区分布图

Fig.10 Distribution of plastic zone after reinforcement

区域大量减少,抗滑装置大大减少了坡体塑性区域的分布面积以及应力集中现象,表明加固效果明显。

5 加固效果分析

在强降雨作用下,设置多种混合加固方式前后滑坡的最大竖向位移、塑性分布以及安全系数对比见表 3。由表 3 可以看出,强降雨作用下,该滑坡体采用多种混合加固方式有效约束滑坡的滑动,减少竖向位移,塑性区域减少变形得到相应控制,滑坡加固后整体上是处于稳定的状态,加固效果比较明显。

表 3 加固前后对比分析表				
Table 3 Comparative analysis table before and after reinforcement				
加固前后	位移	塑性分布	安全系数	稳定性
加固前	0.27 m	分布面积广,应力集中	1.08	失稳
加固后	0.07 m	分布面积减少,应力集中减少	1.11	稳定

综上所述,该边坡在失稳状态下通过多种加固方式混合使用,改变了坡体内部的应力分布,减少坡体应力集中,塑性区域分布面积大大减少。同时锚杆及土钉约束住了边坡的竖向位移,与治理前相比位移减少了 0.2 m,加固方案合理可行,效果明显,满足工程实际要求。

6 结论

以某水库左岸边坡为研究对象,数值模拟计算为主要研究手段,在考虑抗滑装置与滑坡土体之间的相互作用的基础之上,对强降雨作用下滑坡体稳定性以及设置抗滑装置的加固效果进行研究。结果表明:强降雨作用下,滑坡体内部主要以压应力为主,不存在拉应力;滑坡产生的最大竖向位移为 0.27 m,位于滑坡体的中下部;塑性区域面积存在集中现象贯穿滑坡体内部,安全系数为 1.08,显示滑坡可能处于不稳定状态。设置抗滑装置加固处理后,滑坡产生的最大竖向位移相比设抗滑装置前滑坡滑动位移量明显减小,最大竖向位移为 0.07 m,滑坡变形有效控制;塑性区域相比设置装置前,面积明显减少,应力集中

明显减弱。此时安全系数提高为 1.11, 表明加固处理后, 在强降雨作用下滑坡整体处于稳定状态, 治理效果明显。综上可见, 在强降雨作用下, 多种加固处理方式的结合使用对滑坡变形控制起到一定的防治作用, 并且效果较明显。

参考文献

- [1] 邬凯, 杨雪莲, 王军. 山区公路降雨型滑坡区域预警研究[J]. 公路工程, 2018, 43(06): 127-133.
- [2] 朱蕾, 夏承志, 习常志. 库水位升降及降雨作用下的滑坡稳定性研究[J]. 湖北工业大学学报, 2020, 35(05): 92-96.
- [3] 孙云龙, 王艳坤, 刘杰, 等. 强降雨与地下水作用下公路施工期滑坡分析与治理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37(07): 50-55.
- [4] 李光明, 徐世光, 王彦军, 等. 强降雨作用下填土滑坡的失稳机理及加固处理措施研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(02): 103-109.
- [5] 王建洪, 田明, 邹云丽, 等. 云南地区降雨诱发堆积体边坡失稳的力学机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(04): 204-208+227.
- [6] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [7] 汪磊, 尚岳全. 外部降雨条件和内部瞬态承压水作用对堆积层滑坡的影响分析和数值模拟[J]. 水土保持通报, 2020, 40(05): 141-145+151.
- [8] 徐永旺. 顺层岩质边坡加固及开挖稳定性分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [9] 何晖, 李志雨. 基于 FLAC3D 的矿区潜在滑坡稳定性分析[J]. 甘肃科学学报, 2013, 25(03): 32-35.
- [10] 汪旭涛, 黄江, 吴建超. 降雨作用下碎石土滑坡稳定性演化过程分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(01): 54-60+106.
- [11] 洪波罗. 探讨瑞昌市老九驾校西侧滑坡应急治理工程[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(12): 13-16.
- [12] 李梅, 刘校. 桩板墙加固边坡作用效果及结构受力影响试验研究[J]. 金属矿山, 2020(10): 190-196.