

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 10 - 2898 - 07

降雨条件下酉阳大涵边坡滑动机制研究

刘新荣, 张 梁, 余 瑜, 刘 坤

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 以某厚堆积层滑坡为例, 基于非饱和土力学理论, 利用有限元方法, 对雨水入渗条件下坡体的渗流及动态稳定性进行了计算和分析, 研究了水分在坡体内的运移对边坡稳定性的时间效应。结果表明: 边坡堆积体结构松散, 土体强度差, 边坡前缘坡降大, 坡脚的开挖, 为滑坡形成提供了便利条件; 强降雨条件下使得坡脚附近首先发生变形失稳, 牵引坡体后缘产生张拉裂。雨水沿坡面入渗, 在坡体内形成渗流场, 弱化岩土体参数, 同时坡面形成饱和径流, 使滑坡体前缘产生向下的渗透力, 促使前缘坡体发生滑动, 进而引发分级坡体产生滑移; 强降雨初始阶段, 滑坡体安全系数降低较快, 很容易发生滑坡。该研究揭示了降雨入渗诱发厚堆积层边坡滑动机制, 并以此建议采取以截、排、堵措施对边坡进行排水, 同时设置嵌岩锚索抗滑桩及进行削坡清方措施对边坡进行综合治理, 通过稳定性计算, 效果良好。

关键词: 非饱和; 弱化; 降雨; 堆积体; 机制

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Research on sliding mechanism of Dahan slope in Youyang county under rainfall condition

LIU Xin-rong, ZHANG Liang, YU Yu, LIU Kun

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Taking a certain thick accumulation landslide for example, and based on the theory of unsaturated soil mechanics, this paper uses the finite-element method to calculate and analyze the slope seepage and dynamic stability under the condition of rainfall infiltration and studies the time effect of water movement in the slope mass on the slope stability. The results show that the loose structure of the slope accumulation body, the poor soil strength, the large gradient at the slope front edge and excavation at the slope toe have provided a convenient condition for landslide formation. Under heavy rainfall, the deformation instability firstly occurred near the slope toe, and then pulled the slope rear edge and caused the tensile fissures. The rainwater infiltrated along the slope surface, formed the seepage field in the slope body and weakened the rock-soil mass parameters. Meanwhile, the saturated runoffs formed on the slope surface generated the downward seepage force on the slope front edge, and promoted the slope front edge to slide and triggered the slippage of the hierarchical slopes. In the initial stage of the heavy rainfall, the safety factor of the landslide mass reduced rapidly, which easily caused the landslide. This study reveals that the rainfall infiltration induced the sliding mechanism of the slope with thick accumulation horizon, based on which, the paper recommends to take the measures of water cut-off, drainage and water plugging to drain off the water, and to set the rock-socketed anchor cable anti-slide pile and taking the measures of slope cutting and cleanup earthwork to control the slope. Good effect results have been obtained through the stability calculation.

Key words: unsaturation; weakening; rainfall; accumulation body; mechanism

1 引 言

滑坡是指斜坡及边坡上的土体或岩体, 受河流冲刷、地下水活动、降雨、地震及人工切坡等因素

影响, 在重力作用下, 沿着一定的软弱面(带), 整体地或分散地顺坡向下滑动的自然现象, 同时, “滑坡”也指正在变形中的边坡, 崩、滑堆积体和处于稳定状态的崩、滑堆积体^[1-3]。随着我国经济建设

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 2012 年度高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (No. 20120191110039); 干湿循环作用下岩石劣化宏观损伤机制研究。

第一作者简介: 刘新荣, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学、边坡、隧道与地下空间工程等方面的教学与科研工作。

E-mail: liuxrong@126.com

的飞速发展，基础设施的大量动工，引发的大量的挖、填方，对原有的地质力学平衡体产生了一定的扰动，在自然营力作用下，滑坡灾害频发，给经济建设、人民生命财产及重大工程的安全带来严重的危害。

大量的统计资料表明，天然边坡以及铁路、公路、露天矿等的开挖边坡的失稳多发生在降雨期间或降雨之后^[4-6]，可见降雨入渗及地下水对边坡稳定性具有重要意义。为了深入探究降雨诱发的滑坡机制，一些学者通过现场试验、足尺试验以及离心模型试验展开研究^[7-12]，取得丰富的成果，使人们对降雨诱发滑坡的原因以及滑坡发生的过程有了比较清楚地认识。Cho 等^[13]通过流-固耦合二维有限元程序对降雨入渗条件下非饱和土质边坡的稳定性进行了分析，模拟结果表明土体的渗透系数对降雨入渗边坡稳定性有着重要的影响。Lourenco 等^[14]通过模型试验研究了不同渗透系数的层状边坡在降雨入渗条件下的孔隙水压力分布以及边坡的破坏模式。林鸿州等^[15]通过模型试验研究了降雨特性对边坡失稳的影响，提出了采用降雨强度与累积雨量作为雨量预警基准的参数。王睿等^[16]利用离心模型试验对降雨条件下含软弱夹层黏性土坡坡体的吸力和变形规律进行了研究，试验结果表明，由于软弱夹层的遇水软化和高渗透特性，导致了黏性土坡在软弱夹层发生滑出。

一些学者在传统的应力平衡方程的基础上，结合饱和-非饱和渗流理论^[17]，考虑岩土体的非饱和性、渗透系数特征曲线及土-水特征曲线特征，建立渗流场-应力场耦合有限元计算模型，对降雨入渗下非饱和土边坡稳定性进行探讨^[18-19]。吴火珍等^[20]利用运用非饱和土力学方法，分析了堆积层滑坡体在降雨条件下的动态稳定性特征，揭示了堆积体边坡滑动机制及原因。吴长富等^[21]利用非饱和土力学理论，对边坡的瞬态稳定性进行了计算和分析，揭示了水分在坡体内的运移对边坡稳定性的时间空间影响效应以及降雨入渗造成的土性渗透特性变化的影响效应。刘金龙等^[22]基于非饱和土力学理论，利用有限元法对降雨条件下边坡的饱和-非饱和渗流及稳定性进行了探讨，结果表明，雨水入渗使边坡非饱和区土体的基质吸力减小，是导致边坡稳定性降低的主要因素。不过，针对降雨条件下实际的层状边坡，尤其是含软弱夹层的堆积层边坡变形失稳破坏特性，尚少研究。因此，深入研究降雨引发的含软弱夹层的堆积层滑坡体失稳规律并建立定量的分析模型，对于预防和预测这类滑坡灾害具有重要

的指导意义。

本文以渝湘高速公路某含软弱夹层的堆积层滑坡为例，对其构造特征、滑坡类型、滑动机制进行分析，同时基于非饱和土力学理论，利用有限元方法对雨水入渗作用下边坡的稳定性进行了饱和-非饱和数值分析，为此类滑坡的预测与采取合理治理措施提供参考依据。

2 工程概况与渗流模型

2.1 工程概况

滑坡位于重庆市酉阳县与黔江区交界处，由于渝湘高速公路的建设，需要对边坡进行挖、填处理。根据当地气象站资料显示，该地区雨量丰沛，年平均降雨量达 1 337.9 mm，最大降雨强度为 166.1 mm/d，小时最大降雨强度为 96.3 mm/h。该工程地质构成从上到下可分为 3 层：崩坡堆积层土（主要为亚黏土）全-强风化泥质页岩与粉质黏土、中风化页岩，属于典型的崩坡积层边坡。本路段在公路开挖和边坡变形前期，均未见有地下水出露，同时在施工期间钻孔内不返水，终孔后水位大致在基岩面附近，块石土中无水。滑坡平面图及主滑剖面图如图 1、2 所示。

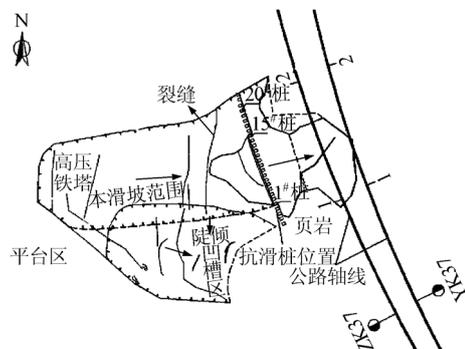


图 1 滑坡体平面图
Fig.1 Plan of the landslide

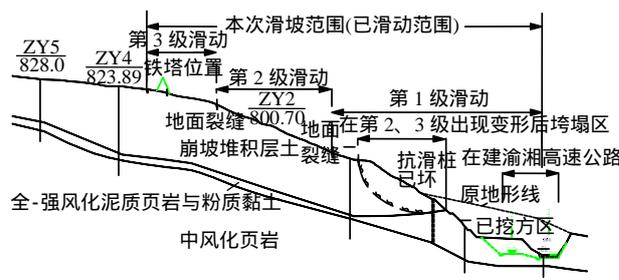


图 2 滑坡体主滑剖面图
Fig.2 Section of the main sliding mass

边坡在开挖过程中，经历了一次百年一遇的强

降雨后，边坡前缘开始变形，抗滑桩破坏，并逐渐向坡体中后部发展，形成从前到后逐渐牵引式分级蠕滑-拉裂滑动破坏变形，见图3。由于滑坡体中部有一高压铁塔，下部为在建渝湘高速公路，一旦滑坡继续发展，将产生巨大的经济损失与社会影响。



图3 边坡前缘变形破坏

Fig.3 Deformation failure of slope front edge

2.2 渗流模型

考虑滑坡体属于崩坡堆积层滑坡，土体结构松散，含有大量碎石及块石体，裂隙发育，透水性强，为了分析降雨条件下其破坏机制及变形过程，采用非稳态非饱和渗流及稳定性计算方法来揭示边坡失稳破坏过程。

2.2.1 计算理论

在边坡工程实践中，经常发现部分潜在滑动面可能处于边坡地下水位线以上，即潜在滑动面可能通过具有负孔隙水压力的非饱和土；同时在降雨期间，地下水主要在基岩以上的岩土体中流动，随着地下水位的上升，坡体内孔隙水压力增大，滑体由非饱和趋向饱和状态，而非饱和区水的运动和饱和区水的运动是相互联系和影响的，将两者统一起来即所谓的饱和非饱和问题。对于各向同性多孔介质，渗流控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial(H - y)}{\partial t} \quad (1)$$

式中： k_x 、 k_y 分别为x和y方向的导水率； Q 为边界上水的流量； m_w 为比水容量，表征为土-水特征曲线在某一特定孔隙水压力处的斜率； γ_w 为水的重度；该方程描述了渗流区单元内某时段流入和流出的总净流量等于体积含水率的变化量。

其边界条件为

(1) 水头边界：

$$k \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{n_1} = h(x, y, t) \quad (2)$$

(2) 流量边界：

$$k \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{n_2} = q(x, y, t) \quad (3)$$

初始条件通常为在开始时刻的渗流场水头分布。在进行非稳定渗流计算时，可先求得开始时刻稳定流场的水头分布作为已知的初始条件；也可取任一时刻的渗流状态作为初始条件。

通过求解式(1)即可得到坡体内的渗流场，本文采用GeoStudio公司的Seep/W软件对边坡降雨入渗条件下的渗流场进行求解，同时结合Slope/W以及Sigma/W模块对边坡的稳定性与应力-应变进行耦合分析^[23]。

2.2.2 计算参数

Seep/W模块可以根据土体的渗透系数和饱和体积含水率，生成土-水特征曲线和渗透系数曲线。土-水特征曲线是基于Fredlund & Xing法，利用颗粒级配曲线及饱和体积含水率得出；渗透系数方程是基于渗透系数和土-水特征曲线采用Fredlund法得出的。滑坡体各层岩土体的渗透性函数以及土-水特征曲线如图4、5所示^[18]。

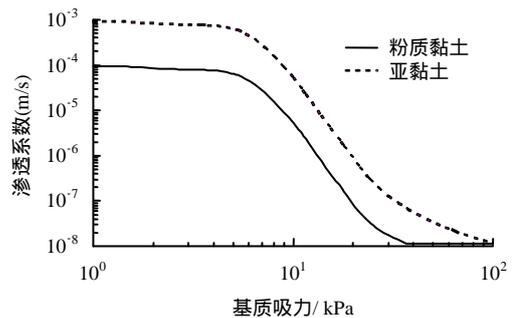


图4 亚黏土与粉质黏土的渗透函数

Fig.4 Permeability function of the loam and silty clay

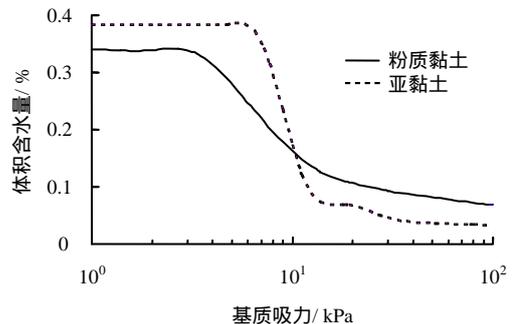


图5 亚黏土与粉质黏土的土-水特征曲线

Fig.5 SWCCs of the loam and silty clay

通过地质分析及现场勘察钻探取得滑坡体原状样进行室内试验，得出各层岩土体的强度参数。滑坡体各土层的物理力学性质参数如表1所示。

2.2.3 计算剖面及边界条件

根据现场地质勘查，选取主滑剖面为计算剖面，

剖面几何形状及地质剖面如图 1、2 所示。根据勘察时测得的 5 个钻孔地下水水位可知，此滑坡体地下水水位均在中风化页岩面以下，对坡面堆积层影响不大，因此，计算时没有考虑初始地下水水位的影响。

表 1 各土层物理力学性质

Table 1 The physico-mechanical properties of each soil layer

土层名称	天然重度 / (kN/m ³)	饱和重度 / (kN/m ³)	有效黏聚力 c' / kPa	有效内摩擦角 φ' / (°)
崩坡堆积层粉质黏土	23.0	23.2	20.0	18.0
全-强风化泥质页岩混粉质黏土	21.6	21.8	13.0	10.6
中风化页岩	26.1	26.4	562.1	33.0

坡体左右两边和底部为不透水边界，坡面为流量边界，流量大小为降雨强度。由于这次滑坡遇到百年一遇暴雨，这里根据当地气象资料及实际情况，降雨单宽流量取值为 $2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。0 水位通过现场勘察以及软件处理取 8.60 m。假设坡面孔隙气压力为大气压，这样基质吸力在数值上等于孔隙水压力，可以用孔隙水压力头表示。

整个滑坡分为 4 级，前 3 级为已经滑动状态，第 4 级为潜在滑动区。由于篇幅有限以及开挖前的边坡相对稳定，本文主要分析开挖后边坡失稳机制以及变形过程。通过现场调查，建立边坡开挖后滑坡体主滑剖面有限元模型如图 6 所示。

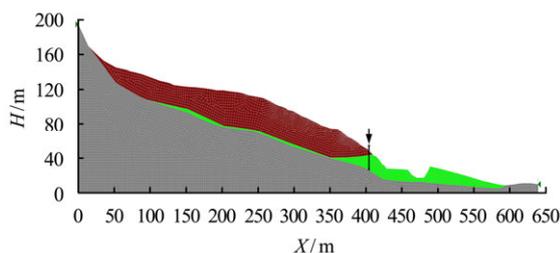


图 6 开挖后滑坡体有限元模型

Fig.6 Finite element model of sliding mass after excavation

3 计算结果及滑坡机制分析

3.1 计算方案

先通过规范^[24]与 Slope/W 对开挖后的边坡在未降雨情况下的稳定性进行计算；然后通过 Seep/W 对边坡进行非稳态非饱和渗流分析；最后通过 Slope/W 以及 Sigma/W 模块对边坡在降雨后的应力-应变及稳定性进行分析。

3.2 计算结果分析

3.2.1 未降雨边坡稳定性分析

在边坡开挖后未降雨的条件下，滑坡防治工程勘查规范^[24]与 Slope/W 分别计算的边坡分级滑动区的安全系数如表 2 所示。

表 2 未降雨分级滑动区安全系数

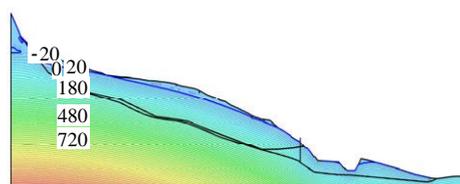
Table 2 The safety factors of the non-rainfall hierarchical sliding areas

方法	1 级滑坡区	2 级滑坡区	3 级滑坡区	4 级滑坡区
规范 ^[24]	1.081	1.075	1.121	1.451
Bishop 法	1.031	1.102	1.181	1.638

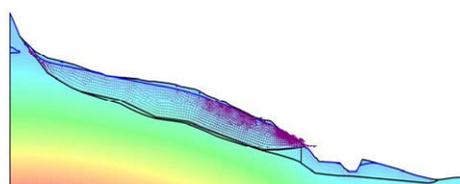
从表 2 可以看出，两种方法下计算的边坡的安全系数比较接近，但安全储备系数不够，临近失稳状态。在外力扰动条件下，1 级滑坡区很容易发生失稳破坏，同时引发 2 级、3 级滑坡。

3.2.2 降雨边坡稳定性分析

按照给定的边界条件，在 Seep/W 程序里分 72 个步长对降雨条件下边坡的瞬态渗流场进行模拟。降雨时间为 72 h，每个步长 1 h。计算的初始状态对应初始的地下水水位。由于篇幅限制，这里给出降雨 36 h 时的边坡孔隙水压力及流场分布，如图 7 所示。孔隙水压力等于 0 的等值线表示坡体内的浸润线，负孔隙水压力为吸力。



(a) 孔隙水压力分布图



(b) 流场分布

图 7 降雨 36.0 h 边坡孔隙水压力及流场分布图

Fig.7 Distributions of pore water pressure of slope and flow field when rainfall lasts 36 hours

从计算结果可以看出，在降雨初期，坡体饱和度较低，入渗量较大，坡面没有径流。随着降雨的持续，坡体表层的饱和度逐渐上升，坡体内的流量增大。当降雨持续到一定时间后，入渗影响深度一

定时,入渗影响深度以上部分基本趋于饱和,负孔隙水压力趋近于 0,基质吸力基本消失,坡体表面形成径流;入渗影响深度以下部分,含水率变化不是太大。由于坡体中间软弱夹层的弱透水性,在降雨条件下,坡体内的水流运移流线最后集中在第 1 级滑坡区域排出,直接弱化的岩土体的强度参数与结构,增加了坡体的重度,导致边坡的下滑力增加,引发第 1 级边坡失稳破坏,进而诱发分级边坡失稳。

选取边坡 1 级滑坡区后缘坡体接触面一点进行孔隙水压力分析,如图 8 所示。从图中可以看出,在降雨 9 h 后,孔隙水压力大致为 0,说明此时土体孔隙水压力已经趋于饱和。此后,孔隙水压力随着降雨时长的增加,逐渐增加,但当降雨 27 h 后孔隙水压力基本保持不变,说明此时降雨强度已经超过土体的入渗能力,形成了坡面径流,这与现场调查的情况相符。

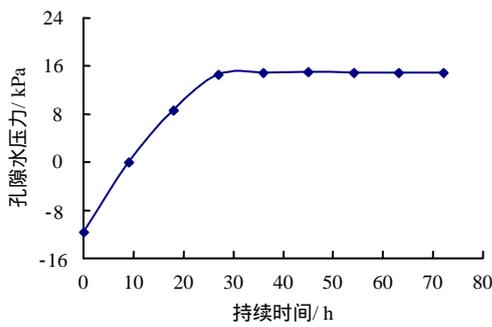
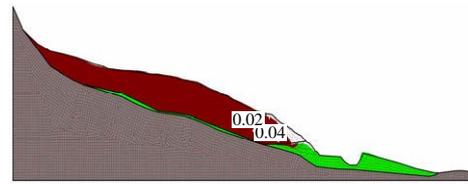


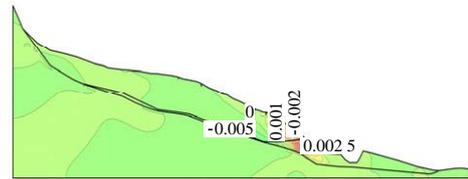
图 8 孔隙水压力与降雨持续时间关系
Fig.8 Relationship between pore water pressure and rainfall duration

通过 Sigma/W 有限元方法对滑坡体变形进行分析,在降雨 72 h 后,边坡有限元网格变形及破坏区域及剪应变的分布如图 9 所示。边坡的最大位移在第 1 级滑坡范围内,达到 0.12 m。在降雨停止后,随着滑坡体的孔隙水压力的消散,水分的蒸发,上部坡体水分向滑坡区运移,导致裂缝增大为米级,继而产生大范围的拉裂破坏。从计算可以看出,由于降雨时间的持续,滑坡表层土体趋于饱和,降雨影响深度内含水率增加,岩土体强度的降低,导致了边坡局部区域应力集中,进而引发边坡的失稳破坏。

通过现场勘察,由降雨引起的本次滑坡是从局部及浅层滑坡开始的,进而引发分级滑动。应用非饱和土边坡稳定性计算方法(Janbu 法),绘制分级滑动折线区,采用折线滑动法对不同降雨历时坡体稳定性进行分析计算,计算参数参见表 1。计算结果如图 10 所示。



(a) 边坡网格单元变形破坏



(b) 剪应变分布

图 9 降雨 72 h 边坡变形及剪应变分布
Fig.9 Distributions of slope deformation of shearing strain after rainfall lasts 72 h

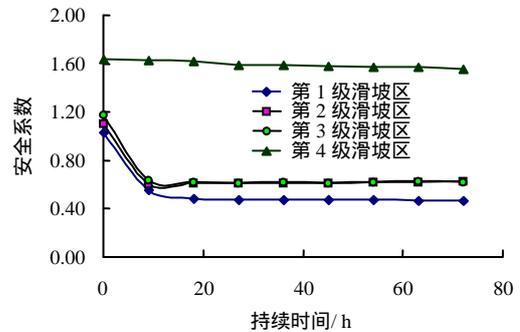


图 10 不同分级滑动区安全系数与降雨历时关系
Fig.10 Relationships between safety factor in different hierarchical sliding areas and rainfall durations

由计算结果可知,滑坡体的稳定性明显受到降雨过程的影响。在降雨历时 10 h 范围内,滑坡体安全系数急剧减小。在降雨初始时刻,第 1、2、3 级滑坡体安全系数略大于 1.0,坡体处于临界稳定状态;当降雨持续 10 h 左右,分级滑坡体安全系数急剧降低到 0.6 左右,处于拉裂失稳状态,这主要是由于分级边坡坡降较大,坡脚开挖,同时雨水入渗对滑坡土体软化,强度大幅降低,坡体内滞水最后通过滑舌渗出坡体,产生了渗透力,从而使分级滑坡体稳定性大为降低;继续降雨,安全系数变化很小,基本保持不变,说明已形成滑坡。第 4 级潜在滑坡体后缘平台区,由于坡降很小,在降雨条件下,边坡处于稳定状态。

事实上,抗滑桩前部的土体大部分垮塌,其水平位移达到 5.0 m 以上;第 3 级滑坡体后部出现大量拉裂缝,抗滑桩前平台区纵向裂缝密集发育,滑坡体失稳特征明显。

3.3 滑坡机制分析

通过以上对降雨条件下堆积层滑坡的分析,认为其滑动机制为:滑坡体前缘坡降较大,坡脚开挖,出现临空面,为边坡失稳提供条件;滑坡体物质结构松散、大孔隙、透水性强等特点,为雨水入渗提供通道。降雨沿厚堆积体表面的裂缝入渗,弱化岩土体的力学性质;随着降雨的持续,在降雨入渗影响深度以上的土体中形成渗流,坡体表面形成饱和径流,对滑坡体前缘产生渗透水压力,使原本临界稳定状态的边坡出现失稳破坏。

根据厚堆积层滑坡体物质组成、滑面、外界条件及计算分析,可以判定致使滑坡发生的原因主要有以下 3 点:

(1) 分级滑坡体岩土体结构松散,地形较陡,坡脚开挖,坡降大。

(2) 强降雨使雨水沿坡面入渗,在坡体内形成渗流场,弱化岩土体参数,同时坡面形成饱和径流,使滑坡体前缘产生向下的渗透力,促使坡体发生滑动。

(3) 原有抗滑桩强度不足,锚固段没有嵌到基岩而使抗滑力不足而失效。

通过滑动机制及原因分析认为:边坡开挖过陡是滑坡发生的主要控制因素,降雨入渗形成的坡体渗流场及坡面的径流,是滑坡发生的主要诱导因素。因此,后期建议采取的治理措施是:通过在第 3 级滑坡区后沿设置一排锚索嵌岩抗滑桩,中部设置挡土墙,然后由上到下逐渐清除滑坡体;滑坡边界设置环形封闭 60 cm×60 cm 截水沟一道,拦截与旁引滑坡范围外的地表和地下水,使之不进入滑坡区,在清方范围内设置排水明沟,同时用隔水性较好的黏土材料填塞边坡出现的裂缝并夯实,防止地表水沿裂缝下渗坡体。采取建议治理方法后的边坡及稳定性计算如图 11 所示。治理后的边坡安全系数为 1.301,有一定的安全储备,达到治理的目的。

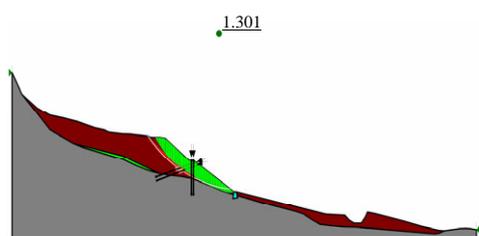


图 11 治理后的边坡安全系数

Fig.11 The safety factor of the slope after treatment

4 结 论

(1) 降雨入渗对边坡的稳定性具有重要影响。

雨水入渗使边坡非饱和区土体的基质吸力减小,产生渗透力,是导致边坡稳定性降低的主要因素。

(2) 滑坡破坏模式为:由于坡脚开挖,降雨条件下使得坡脚附近首先发生变形失稳,牵引坡体后缘产生张拉裂。地表水沿裂缝的大量入渗,使得土体强度降低,坡体前缘产生挤压剪切滑动面,在渗透力及动水压力作用下形成牵引式多级滑坡破坏。

(3) 通过降雨、稳定性与时间的动态分析,在强降雨的初始阶段,是边坡安全系数降低最快的时间段,边坡很容易发生失稳滑动。在强降雨情况下,坡体表层土体迅速饱和,坡体内形成渗流场及坡面形成径流,增加了坡体前缘的下滑力,促使坡体失稳。

(4) 对于厚层堆积滑坡体,抗滑桩嵌固段须嵌入滑床基岩中,约为桩长的 1/3 ~ 2/5,以达到足够的抗滑力保证边坡稳定。

参 考 文 献

- [1] 陈洪凯,唐红梅. 四川境内公路水毁的基本特征及防治问题探讨[J]. 重庆交通学院学报, 1994, 13(10): 103. CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Studies on the basic features & the prevention and control countermeasures of waste-watering of highway in Sichuan area[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 1994, 13(10): 103.
- [2] 陈洪凯. 公路水毁学[M]. 北京: 科技文献出版社, 2000.
- [3] 翁其能,唐红梅,陈洪凯,等. 滑坡治理过程中岩土体变形场的演绎趋势分析——以西(昌)木(里)路新烧房滑坡为例[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(1): 69 - 73. WENG Qi-neng, TANG Hong-mei, CHEN Hong kai, et al. Developing tendency analysis of slope deformation composed of loose rock in the course of harnessing of landslide——Taking the Xinshaofang landslide in the highway from Xichang to Muli as example[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 2001, 20(1): 69 - 73.
- [4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析-原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 1 - 10. ZHONG Li-xun. Case study on significant geohazards in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1999, 10(3): 1 - 10.

- [7] 徐永年, 匡尚富, 李文武, 等. 边坡形状对崩塌的影响[J]. 泥沙研究, 1999, 5: 67 - 73.
XU Yong-nian, KUANG Shang-fu, LI Wen-wu, et al. Effects of slope shape on avalanches[J]. **Journal of Sediment Research**, 1999, 5: 67 - 73.
- [8] 徐永年. 土质条件对坡体崩塌的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 7 - 14.
XU Yong-nian. Influence of earth condition on avalanche[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1999, 10(4): 7 - 14.
- [9] OKURA Y, KITAHARA H, OCHIAI H, et al. Landslide fluidization process by flume experiments[J]. **Engineering Geology**, 2002, 66(1): 65 - 78.
- [10] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. **Landslides**, 2004, 1(4): 277 - 288.
- [11] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 2: 151 - 158.
ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 2: 151 - 158.
- [12] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. **Landslides**, 2004, 1(3): 211 - 219.
- [13] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. **Computers and Geotechnics**, 2001, 28, 185 - 208.
- [14] LOURENCO S D N, SASSA K, FUKUOKA H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides[J]. **Geomorphology**, 2006, 73: 115 - 130.
- [15] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198 - 204.
LIN Hung-chou, YU Yu-zhen, LI Guang-xin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 198 - 204.
- [16] 王睿, 张嘎, 张建民. 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1582 - 1587.
WANG Rui, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge modeling of rainfall-induced deformation of slopes with weak layers[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(10): 1582 - 1587.
- [17] THOMAS H R, HE Y. Coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1997, 40(18): 3421 - 3441.
- [18] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [19] WONG T T, FREDLUND D G, KRAHN J. Numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(6): 926 - 937.
- [20] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊): 324 - 329.
WU Huo-zhen, FENG Mei-guo, JIAO Yu-yong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31 (Supp.1): 324 - 329.
- [21] 吴长富, 朱向荣, 尹小涛, 等. 强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 386 - 391.
WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of soil slope's transient stability under intensive rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 386 - 391.
- [22] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利, 等. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 103 - 107.
LIU Jin-long, LUAN Mao-tian, WANG Ji-li, et al. Seepage and stability analysis of saturated-unsaturated soil slope under rainfall infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.): 103 - 107.
- [23] Geo-slope International Ltd. Geo-slope user's manual[M]. Calgary: Alberta, 2001.
- [24] 中华人民共和国地质矿产行业标准编写组. DZ/T 0218 - 2006 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.