

文章编号: 1000-7598 (2011) 增刊 1-0476-08

降雨及库水位联合作用下秭归 八字门滑坡稳定性预测

张桂荣¹, 程 伟²

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210024; 2. 中南电力设计院, 武汉 430074)

摘 要: 针对三峡库区库水位调控方案和极端降雨情况, 对秭归县八字门滑坡稳定性分析设置了 10 种计算工况, 采用 SEEP/W 软件模拟该滑坡在降雨入渗及库水位联合作用下的暂态渗流场, 并利用 SLOPE/W 软件, 将暂态孔隙水压力分布用于该滑坡的极限平衡分析中, 确定不同工况下 (不同降雨强度) 的滑坡稳定性系数, 据此采用降雨量对该滑坡进行失稳预测。研究认为: 150 mm/d 以上的降雨量对该滑坡影响较大, 降雨入渗具有滞后性; 在相同的降雨量情况下, 1 d 的降雨强度比 5 d 的连续降雨对滑坡体的稳定性影响更明显; 在水位从 175 m 降至 145 m 的过程中, 临界雨量为 100 mm/d 时, 滑坡就可能失稳; 水位从 145 m 升至 175 m 的过程和 175 mm 稳定水位时, 当临界雨量为 200 mm/d 时, 滑坡才可能失稳, 即水位骤降过程中滑坡失稳概率大。不同工况下的滑坡土体含水率分析结果表明, 降雨影响的主要是上部土体, 下部土体含水率受控于地下水位, 即降雨更容易引起浅层滑坡与局部滑坡。

关 键 词: 八字门滑坡; 临界降雨量; 水位波动; 稳定性预测

中图分类号: TD 853.34

文献标识码: A

Stability prediction for Bazimen landslide of Zigui County under the associative action of reservoir water lever fluctuations and rainfall infiltration

ZHANG Gui-rong¹, CHENG Wei²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aimed at regulated scheme of Three Gorges Reservoir and extreme rainfall events, 10 working conditions were set for stability analysis of bazimen landslide of Zigui county. Transit seepage due to associative action of reservoir water lever fluctuations from 175 to 145 and rainfall infiltration was simulated adopted by SEEP/W software. And by using SLOPE/W software, the computed transit pore water pressures were used for limit equilibrium analysis of this landslide, then the landslide stability factors of different work conditions (different rainfall intensity) were decided and the rainfall could be used to predict landslide at last. The stability study showed it would have a great influence on landslide stability when the rainfall is greater than 150 mm/d, and rainfall infiltration had time delay. In the same condition of rainfall, the influence of one day's rainfall intensity on landslide stability had greater than five day's rainfall intensity. During the process of water lever descending from 175 m to 145 m, the landslide would be instability when the critical rainfall was 100 mm/d. That is to say, the landslide failure probability was high during the rapid drawdown. During the process of water lever ascending from 145 m to 175 m and the stable water lever of 175 mm, the landslide would be instability while the critical rainfall was reach to 200 mm/d, that means the landslide failure probability was low under the above two conditions. The results of moisture analysis on landslide showed that it mainly influenced upper soil by rainfall, and lower soil's moisture was controlled by underground water, which indicated rainfall was accessible to cause shallow slope and local slope.

Key words: Bazimen landslide; critical rainfall; water lever fluctuations; stability prediction

1 引 言

在滑坡稳定性分析中, 降雨是一个十分重要的因素, 在长江中上游地区雨季滑坡数量占全年滑坡总数的 87%以上^[1-2]。雨水对滑坡的危害主要表现

在两个方面: 一是滑坡体浅层土体迅速达到饱和, 坡面形成地表径流, 对坡面造成冲刷; 二是渗透到坡体内部导致渗流场的变化, 从而使滑坡土体的含水率增大及土体抗剪强度的降低。因此, 滑坡稳定性与降雨量大小、持续时间、库水位升降密切相关。

收稿日期: 2010-06-10

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51009097)。

第一作者简介: 张桂荣, 女, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事滑坡稳定性预测预报方面的研究。E-mail: zhgr5297@126.com

大量的统计资料表明,大多数的滑坡是发生在降雨期间或降雨之后,一个地区的滑坡发育程度有随降雨量增多而增强的规律,很多学者应用统计方法得出不同地方诱发滑坡群发的临界降雨强度。国内对三峡库区滑坡研究结果认为,当雨强大于 6 mm/h,日降雨量大于 30 mm,一次降水过程累计雨量大于 100 mm,即可能使浅层堆积体出现初滑迹象^[3];在台风频繁的浙江省,张桂荣等^[4]将该地区划分为台风区和非台风区,建立地质-气象耦合的预警模型,认为当一次降雨过程有效降雨量阈值分别达到 275 mm 和 225 mm 时,将会引发大量的滑坡灾害;在香港地区,Brand 等^[5]、Au 等^[4]在详细分析了 1963—1983 年的滑坡数目与 1~30 d 的累积降雨关系之后,认为香港地区的绝大多数滑坡由短时高强度的降雨引发,70 mm/h 的降雨强度被看作是可能发生滑坡的临界雨强,若降雨量超过 100 mm/d,滑坡失稳数量显著增加。另外,随着孔隙介质非饱和渗流和土体饱和渗流理论的发展,在国内外学者已越来越清楚地认识到雨季土质滑坡、泥石流等地质灾害与土体非饱和渗流密切相关^[7]。在这方面,很多学者做了大量的研究工作^[8-11],主要是分析降雨条件下边坡土体的入渗能力,含水率(饱和度)、孔隙水压力的变化,边坡内饱和-非饱和渗流场的变化规律等,为边坡稳定性分析提供依据。

三峡水库运营后,库水位在 145~175 m 之间周期性波动,且三峡库区属于多雨地区。在库水位大幅波动和强降雨的联合作用下,库岸涉水滑坡体内地下水动力场发生强烈变化,进而对库岸两侧的大量滑坡体产生威胁。前人在这方面已经做了大量的研究工作,如开展库水位骤降与降雨耦合作用下滑坡体稳定性分析^[12];库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析^[13];确定不同库水位及降雨强度下滑坡体内浸润线等^[14-15]。

三峡地质灾害治理工程获得了十分宝贵的地质资料,本文在这一基础上,对降雨入渗及库水位升降引起的三峡库区典型滑坡的稳定性变化进行研究。根据三峡库区滑坡特点及地质资料的翔实情况,选择秭归县八字门滑坡这一典型案例进行深入研究,以期通过对该滑坡的失稳分析,建立直接利用降雨量对库区滑坡进行稳定性预测的判别模式,旨在为滑坡体的失稳预测提供一种简单、快捷的方法,这也是本文在技术思路上的创新。

2 八字门滑坡地质特征

八字门滑坡位于湖北省秭归县归州镇香溪村

香溪河右岸,距河口为 0.8 km,距三峡坝址为 38 km。滑坡体长为 350 m,宽为 350~500 m,平均厚度为 30 m,体积约 400 万 m³,属堆积层滑坡,岸坡为内倾边坡。

该滑坡发育在侏罗系香溪组(J₁x)地层中,香溪组砂泥岩夹煤层,强度低,遇水易软化,易风化。按照成因类型、物质成份、结构,自上而下将八字门滑坡体划分为 3 组岩土层(图 1):①粉质黏土夹碎块石层,主要分布于滑坡中下部 3 级平台上;②碎块石土层,全滑坡区分布,主要由块石、碎石及粉质黏土组成,土石比为 4:6;③碎石角砾土层,主要分布滑坡体中后部,由碎石角砾及粉质黏土组成,土石比为 3:7。

八字门滑坡形成较早,属老滑坡。根据钻探揭露,前部存在两层滑带,上部为次级滑面,主滑带在滑体底部与滑床界面之间连续分布,滑面倾角中后部较陡,约 20°~30°,前部平缓并略为反翘,其厚度变化区间为 0.9~3.6 m,滑坡是沿土石接触面或冲洪积物顶面滑出。滑带厚度变化总体趋势表现为上部薄、下部厚、前缘薄。上部的次级滑带厚度变化区间为 2.5~3.2 m,与主滑带性质相似。滑带物质为角砾土,局部表面具磨光面、擦痕,成份以砂岩、泥岩为主;充填粉质黏土,软塑~可塑状。

八字门滑坡的滑床基岩主要为强~中等风化长石英砂岩和泥质粉砂岩互层,局部夹炭质泥页岩。滑床可分两级,后部较陡坡度 20°~30°,中前部为一侵蚀平台,平台宽为 200~400 m,标高为 93~128 m,平台中部略呈反翘形态。

目前,该滑坡仍然处于持续变形中,具明显地持续累积性位移变化,宏观上主要表现为地表裂缝张开、公路裂开下沉等。

3 稳定性计算模型及工况

3.1 计算软件介绍

本文采用加拿大岩土软件 GEOStudio 进行渗流和滑坡稳定性分析。滑坡渗流分析采用 SEEP/W 程序,稳定性分析采用 SLOPE/W。在应用中,首先在 Seep/w 程序中作暂态渗流问题分析,得到各个不同时间下渗流场的水头分布;然后将渗流场中的水头值输入到边坡稳定性计算软件 SLOPE/W 中,在该软件中用条分法计算滑动体的稳定性系数。

计算过程中,为了将 SEEP/W 中的有限元水头值转换到 SLOPE/W 中,首先将 SEEP/W 中的有限元网格引入到 Geo-Slope 中,在此网格上重新建立稳定性分析模型,包括滑动面的确定和土体的条分

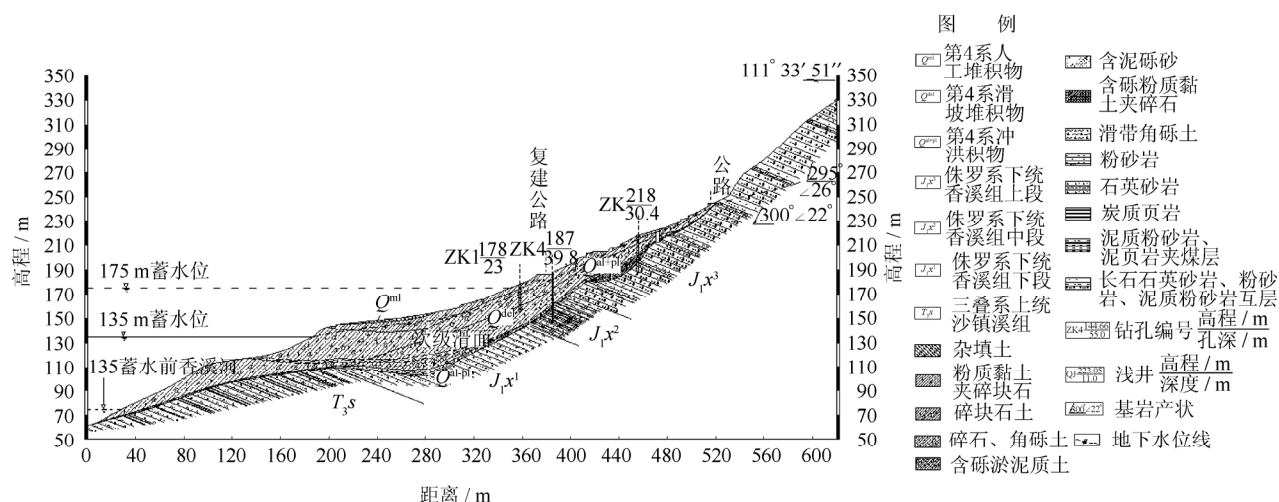


图1 八字门滑坡 A-A'地质剖面图

Fig.1 A-A' geological profile of Bazimen landslide

数目和方法;然后在每一个潜在的滑动面上,找出各土条的底面中心点,并找到底面中心点所在的土体单元。利用SEEP/W传递给SLOPE/W所有的节点水头信息,SLOPE/W找到各土条底面中点在其单元中的相对坐标及其相应的插值函数矩阵,从而利用以下方程计算出底面中心点处的水头值,即

$$h = N \{H\} \quad (1)$$

式中: h 为局部坐标下的水头(m); N 为插值函数向量; $\{H\}$ 为节点处的水头向量。这样就将动态的渗流场与极限平衡分析结合了起来。根据渗流分析确定的孔隙水压力分布情况,可以确定坡体内强度场的分布规律。同时,渗流分析中得到的地下水位作为极限平衡分析中的渗流情况的输入参数,以考虑地下水位的升降对边坡稳定的影响。地下水位以下土体按饱和土强度参数取值,地下水位以上土体根据非饱和土强度公式确定。

3.2 模型建立

根据八字门滑坡的工程地质特征,选择 A-A'剖面作为计算剖面(见图1),将基岩看成隔水层。模型共剖分为3 628个单元,3 904个节点。初始渗流模拟的地下水位是钻孔资料揭示的稳定地下水

位。模型边界条件为:底部为隔水边界,即零流量边界;在175 m和145 m水位工况时为定水头边界,当库水位在此高程间变化时为变水头边界;库水位以上,在有降雨过程时为已知流量边界。岩土体的物理力学参数见表1。

3.3 计算工况

一般而言,滑坡的发生往往在每年的极值降雨或每年某个时段的极值降雨条件下,如最大1日降雨、最大2日降雨、最大多日降雨、多日累计降雨、最长一次连续降雨等等。由于滑坡具有其自身的地质特征,故其对应的最相关或最危险的降雨参数可以进行选择,如浅层土质滑坡可以选择最大1日、2日或3日短时累积降雨量;而深层土质滑坡或完整基岩滑坡可选择多日累积降雨或最长一次连续降雨作为降雨参数等^[16]。

根据三峡水库防洪、发电与航运的需要,水库运营后,库水位调控设计成雨季一般保持145 m水位运行;枯水期来临时,库水位由145 m升至175 m;雨季来临前又由175 m降到145 m。一个水文年内库水位在145~175 m涨落,水位变动幅度达30 m;结合滑坡所在区秭归县归州镇降雨特征,确定八字

表1 岩土体的物理力学参数表

Table 1 Physics and mechanism parameters

岩性	天然重度 (kN/m ³)	饱和重度 (kN/m ³)	饱和体积 含水率/%	饱和渗透系数 (10 ⁻⁵ cm/s)	天然抗剪强度		饱和抗剪强度	
					c /kPa	φ /°	c /kPa	φ /°
粉质黏土夹碎石	23.2	24	30	20	110	28	55	24.0
碎块石土层	25.4	26.3	25	30	280	31	210	26.3
碎石角砾土层	26.0	26.5	25	20	305	33	215	27.2
滑带(角砾土 充填黏土)	24.3	25.5	30	2	17.6	19	15	15.5

门滑坡稳定性计算工况如表 2 所示。需要说明的是, 库水位升降速度以最大速度 2 m/d 设定, 降雨工况根据各时段特征设定。由于每一种工况条件下, 对应的降雨参数的极值存在一定重现期条件下的分布特征, 故每一种工况下, 滑坡在不同重现期降雨条件下对应不同的地下水体系。

表 2 滑坡稳定性计算工况
Table 2 Working condition for landslide stability

时段	库水位/m	降雨状态
10 月	145~175	1、2、3 日短时暴雨
		15 日累积降雨
		最长一次连续降雨
11 月初至次年 4 月底	175	15 日累积降雨
		最长一次连续降雨
5 月初至 6 月中旬	175~145	1、2、3 日短时暴雨
		15 日累积降雨
6 月中旬至 9 月底	145	1、2、3 日短时暴雨
		15 日累积降雨
		最长一次连续降雨

注: 在对秭归县 1983—2006 年 28 年间的降雨资料分析后获得最大一次连续降雨特征值。

4 降雨渗流模拟及稳定性计算

4.1 初始条件下滑坡稳定性分析

八字门滑坡在定水头边界 145 m 水位和 175 m 水位下的稳定性分析结果见图 4。计算结果表明: 当水库蓄水至 175 m 时, 同 145 m 水位下相比, 虽然滑体抗剪强度有所降低, 但由于 175 m 水位条件下, 滑坡前部为阻滑段, 地形平缓, 大部分处于 175 m 水位以下, 在库水水平方向水压力作用下边坡整体稳定性有所提高。

4.2 降雨渗流模拟

(1) 1 d 降雨强度影响模拟

降雨渗流模拟边界条件以初始水位边界模拟为基础, 在坡面增加降雨入渗流量边界, 以构成降雨模拟的瞬态模型 (非稳定流分析)。流量的大小等于降雨强度或蒸发率。程序运行时, 自动判断降雨强度和渗透率的关系, 如果降雨强度大于表层土渗透率, 则按定水头边界条件处理, 多余雨量将不计入渗流计算; 如果降雨强度小于表层土渗透率时, 按定流量边界条件处理。

由于不同的降雨强度对滑坡的影响是不同的, 选取了降雨强度为 50 (暴雨)、100 (大暴雨)、150、200、250 mm/d, 这些天降雨强度采用等强型雨型, 作为渗流的边界条件, 其平均降雨强度见表 3。

图 2~3 为 145 m 水位下的渗流模拟结果, 可以看出, 随雨强增加, 滑坡体内浸润线随之升高。

表 3 降雨边界条件
Table 3 Boundary condition of rainfall

降雨强度 / (mm/d)	50	100	150	200	250
渗透参数 / (m/s)	5.79×10^{-7}	1.16×10^{-6}	1.74×10^{-6}	2.31×10^{-6}	2.89×10^{-6}

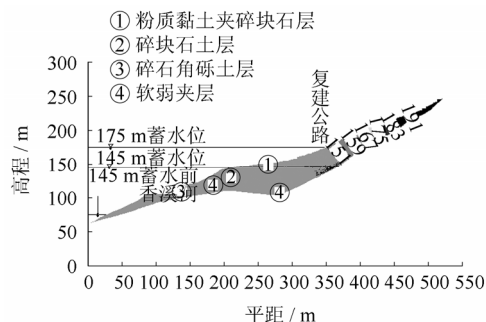


图 2 145 m 水位与 50 mm/d 降雨条件下滑坡水头分布及水位线 (降雨 1 d)

Fig.2 Hydraulic pressure distribution and water line under the co-work of 145 m water lever and 50 mm/d rainfall (one day of rain)

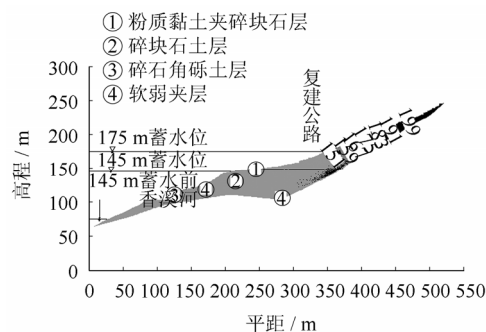


图 3 145 m 水位与 250 mm/d 降雨条件下滑坡水头分布及水位线 (降雨 1 d)

Fig.3 Hydraulic pressure distribution and water line under the co-work of 145 m water lever and 250 mm/d rainfall (one day of rain)

等强型 1 d 降雨结束滑体稳定性随时间的变化关系见图 4。由图可见, 50、100 mm/d 的降雨对其稳定性影响较小, 150 mm/d 以上的降雨影响稍大, 这说明特大暴雨 (≥ 150 mm/d) 与滑坡的相关性最显著。从图中还可以看出, 当降雨强度为 50 mm/d 时, 滑坡稳定性在 8 d 后达到最低; 当降雨强度增大, 达到 100~150 mm/d 时, 滑坡在 3 d 后才处于最不稳定状态。当降雨强度达到 200 mm/d 以上, 滑坡常常在降雨当时或仅滞后 1~2 d 即达到最不稳定状态, 这一结果印证了降雨入渗具有滞后性这一规律。

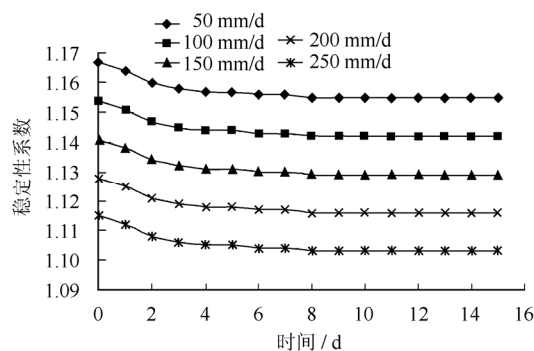


图4 1 d 降雨结束后滑坡稳定性随时间变化关系图(145 m 水位)

Fig.4 The curves of landslide stability varied with time after one day of rain (145 m water lever)

(2) 多天降雨强度影响模拟

为了说明在相同的降雨量下,不同的降雨时间,即降雨的持续时间对滑坡的影响,本文选取了200、300、400 mm/d 与 200、300、400 mm/(5d)作了对比分析。本文仅列出了降雨量为200 mm/d 和200 mm/(5 d) 时的对比结果(图5)。可以看出,在相同的降雨量情况下,1 d 的降雨强度比5 d 的连续降雨对滑坡体的稳定性影响更明显,且降雨量越大,1 d 的降雨强度比连续5 d 的降雨强度对滑坡体的稳定性改变值越大。

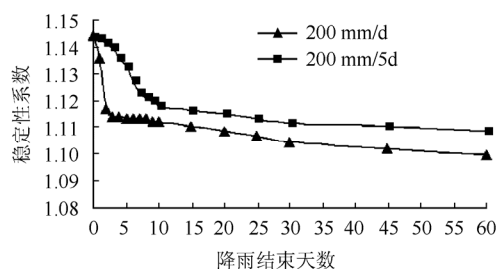


图5 200 mm/d 与 200 mm/(5d)降雨结束后稳定性变化图

Fig.5 The varied curves of landslide stability after 200 mm/d and 200 mm/(5 d) rainfall

4.3 降雨及库水位耦合条件下渗流模拟及稳定性分析

根据三峡水库调控方案,每年5月初到6月中旬,库水位从175 m 降至145 m,降速约为1.2~2.0 m/d。对于库区滑坡,最不利因素是库水位骤降和暴雨同时作用,在175~145 m 库水位变化和暴雨条件下,滑体内部形成了较大的水力梯度,因地下水渗透压力增加对滑坡的不利影响大于浮力减少对滑坡的有利影响,故滑坡体容易失稳破坏。本文给出了降雨及库水位联合作用下最危险极值降雨(百年一遇15 d 累积最大降雨)的模拟结果,如图6所示。

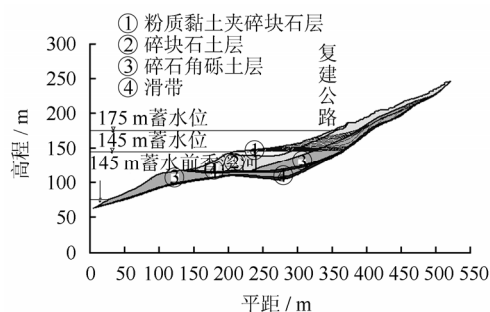


图6 175~145 m 水位与百年一遇15 d降雨耦合条件下水位线(水位下降速度为2 m/d)

Fig.6 Diagram of landslide water lever under the union of water lever fall from 175 m to 145 m and fifteen days of rainfall of occurring once in 100-years (velocity of water lever fall was 2 m/d)

图7给出了不同降雨强度和库水位共同作用下,5 d 持续降雨后滑坡稳定性分析结果。其中,在175 m 水位状态下,仅当降雨量超过200 mm/d 时滑坡才可能失稳,滑坡的整体稳定性最好;而在175 m 水位降至145 m 水位过程中,由于渗透压力的作用,当降雨量超过100 mm/d 滑坡就处于临界稳定状态,此种工况下滑坡最不稳定。由该图也可以看出,八字门滑坡目前稳定性系数不高,在三峡水库调节、暴雨条件下,滑坡处于不稳定状态,极有可能发生复活。

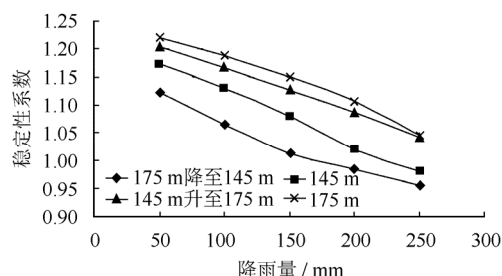


图7 不同降雨强度(5 d 持续降雨)和库水位条件下滑坡稳定性分析结果

Fig.7 Results of landslide stability under the union of reservoir variation and differed rainfall intensity (consecutive five days of rainfall)

对该滑坡,确定1.05为失稳临界值,即当稳定性系数大于1.05时,滑坡稳定;反之则认为滑坡处于失稳状态。从图7可以得出不同库水位条件下滑坡失稳临界降雨量值。175 m 降至145 m 的过程中,水位降速为2 m/d 时,临界雨量为100 mm/d,即滑坡在该雨量下易发生失稳破坏;对145 m 水位,临界雨量为150 mm/d;145 m 升至175 m,水位升速为2 m/d 时及在175 m 库水位下,临界雨量均为200 mm/d。

5 不同降雨工况下滑体含水率规律分析

含水率是影响非饱和土体渗透系数的关键要素之一,也是影响降雨入渗能力的重要因素。降雨入渗过程增加了滑坡体的含水率,从而降低土体的抗剪强度,导致滑坡失稳破坏。

八字门滑坡初始条件下渗流分析结果表明,该滑坡表层土体初始体积含水率 θ_0 为 0.14,饱和体积含水率 θ_s 为 0.35。图 8 显示了 4 种降雨强度下,从 145 m 水位线与滑坡接触位置(定为初始位置 x_0)算起的表层 16 个节点含水率分布情况。由该图可知:在 x_0 附近,土体含水率由于受地下水位影响,接近饱和;水平方向距 x_0 越远,滑坡土体中各处的体积含水率越小;随降雨强度的增大,土体含水率增加。

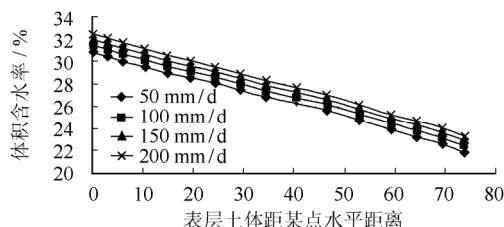


图 8 不同降雨强度下表层土体沿水平方向含水率分布图
Fig.8 Moisture diagram of surface soil along with the horizon under differed rainfall intensity

图 9 是将滑坡体中的某点定为分析的初始位置,分析在降雨强度 100 mm/d,降雨持续 3 d 后不同深度处土体含水率沿水平位置的分布。图 10 是在不同降雨强度下降雨持续 3 d 后某点不同深度处的土体含水率分布图。由两图可以看出:表层土体的含水率要比土体内部大;随深度增加,土体含水率在减小。但当深度增加到距离浸润线(147 m 左右)10 m 左右,含水率开始逐渐增大,且增幅大于上部土体含水率降幅,即降雨影响的主要是上部土体,下部土体含水率受控于地下水位。因此,降雨更容易引起浅层滑坡与局部滑坡。

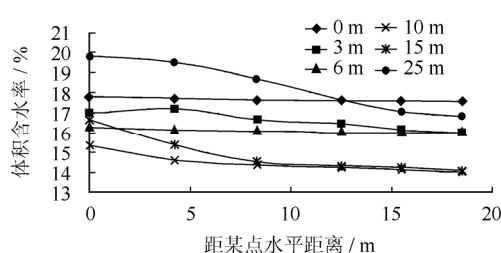


图 9 不同深度处土体沿水平方向含水率分布图
Fig.9 Moisture diagram with depth of soil along with the horizon

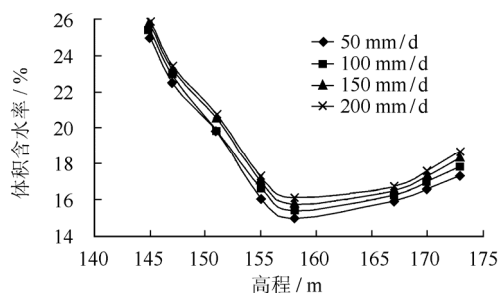


图 10 降雨 3 d 后不同降雨强度下土体含水率分布图
Fig.10 Soil moisture diagram under differed rainfall intensity after three days of rain

6 结 论

(1) 选择秭归县八字门滑坡,利用非饱和土渗透固结理论和抗剪强度理论,根据入渗雨量模拟土体中含水率的变化;利用极限平衡理论,预测在库水位升降及不同降雨量级下滑坡体稳定性。

(2) 八字门滑坡的数值模拟结果显示,50 mm/d 的降雨对滑坡的稳定性影响较小,200 mm/d 和 250 mm/d 的降雨影响稍大;在相同的降雨量(200 mm/d 与 200 mm/(5d)、300 mm/d 与 300 mm/(5d)、400 mm/d 与 400 mm/(5d))下,降雨的持续时间对滑坡的影响结果是 1 d 的降雨强度比 5 d 的连续降雨对滑坡体的稳定性影响更明显,且降雨量越大,1 d 的降雨比连续 5 d 的降雨对滑坡体的稳定性改变值越大。

(3) 滑坡失稳存在一个临界降雨量。降雨及库水位联合作用下的八字门滑坡数值模拟结果表明,在 175~145 m 库水位变化和暴雨条件下,该滑体内部形成了较大的水力梯度,地下水渗透压力增加使坡体处于最不稳定状态。根据分析结果,确定了该滑坡在不同工况下的失稳临界降雨强度,即水位从 175 m 降至 145 m 的过程中,该滑坡失稳的临界雨量为 100 mm/d;在 145 m 的稳定水位时,该滑坡失稳的临界雨量为 150 mm/d;稳定水位从 145 m 升至 175 m 的过程中和 175 mm 稳定水位时,当临界雨量为 200 mm/d 时,滑坡才可能失稳,即库水位骤降过程中滑坡失稳可能性大为增加。

(4) 含水率是影响非饱和土体渗透系数的关键要素之一,也是影响降雨入渗能力的重要因素;同时,降雨入渗增加滑坡体的含水率,降低土体的抗剪强度,导致滑坡失稳破坏。不同工况下的滑坡土体含水率分析结果表明,降雨影响的主要是上部土体,下部土体含水率受控于地下水位,即降雨更容易引起浅层滑坡与局部滑坡。

参考文献

- [1] 杜榕桓, 刘新民, 袁建模, 等. 长江三峡工程库区滑坡与泥石流研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991.
- [2] 谢守益, 张年学, 许兵, 等. 长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J]. 工程地质学报, 1995, 6(2): 60—69.
- XIE Shou-yi, ZHANG Nian-xue, XU Bing, et al. Probability analysis of precipitation-induced slide of typical landslide in Three Gorges Area of the Yangtze River[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1995, 6(2): 60—69.
- [3] 王发读. 浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J]. 水文地质工程地质, 1995, 1: 20—23.
- WANG Fa-du. Research on landslide features of shallow accumulation and their affinity between precipitation[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 1995, 1: 20—23.
- [4] 张桂荣, 殷坤龙, 刘礼领, 等. 基于 WEBGIS 和实时降雨信息的区域地质灾害预警预报系统[J]. 岩土力学, 2004, 26(8): 1313—1334.
- ZHANG Gui-rong, YIN Kun-long, LIU Li-ling, et al. A real-time regional geological hazard warning system in terms of WEBGIS and rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 26(8): 1313—1334.
- [5] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslide in Hong Kong[C]//Proceeding 4th International Symposium Landslides. Toronto: [s. n.], 1984, 1: 377—384.
- [6] AU S W C. Rainfall and slope failure in Hong Kong[J]. **Engineering Geology**, 1993, 36: 141—147.
- [7] 弗雷德隆德 D C. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] FREDLUND D G. Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction[C]//Slope Stability. New York: Wiley, 1987, 113—144.
- [9] FUCHU D, LEE C F, SIJING W. Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong[J]. **Engineering Geology**, 1999, 51(4): 279—290.
- [10] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 3(1): 1—14.
- WU Hong-wei, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 3(1): 1—14.
- [11] 徐焱, 朱以文, 蔡元齐, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1957—1962.
- XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1957—1962.
- [12] 刘新喜. 库水位下降对滑坡稳定性的影响及工程应用研究[博士论文 D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.
- [13] 李晓, 张年学, 廖秋林, 等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3714—3720.
- LI Xiao, ZHANG Nian-xue, LIAO Qiu-lin, et al. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3714—3720.
- [14] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3025—3031.
- WU Qiong, TANG Hui-ming, WANG Liang-qing, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3025—3031.
- [15] 周丽, 汪洋, 杜娟. 库水位下降和降雨影响下李家湾滑坡的稳定性计算[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(3): 5—9.
- ZHOU Li, WANG Yang, DU Juan. Calculation of Lijiawan landslide stability under the drawdown and rainfall conditions[J]. **Safety and Environmental Engineering**, 2010, 17(3): 5—9.
- [16] 陈丽霞. 库岸单体滑坡灾害风险预测研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.