

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.29

# 三峡库区蔡坡堆积体库水位联合降雨工况下的 渗流特性及边坡稳定性研究

李险峰

(淮北职业技术学院 建筑工程系, 安徽 淮北 235000)

**摘要:** 目前,关于库水位联合降雨不同工况组合下滑坡渗流稳定问题的研究较少,为此基于非饱和渗流及稳定分析理论,以三峡库区蔡坡堆积体为研究背景,利用 Geostudio 软件对降雨、库水位及其组合工况下的堆积体边坡的渗流特性及稳定性进行了数值模拟,得到了边坡不同部位的孔压变化、边坡的安全系数曲线及湿润锋发展规律。结果表明:库水位骤降速率越大,则孔压下降越快,降雨强度越大,则孔压上升幅度越大,单纯降雨孔压上升幅度要大于库水位骤降情况孔压下降幅度。降雨发生在库水位骤降不同时刻的孔压特性综合了单纯降雨与单纯库水位下降的综合特性,位于边坡下部的孔压值要大于上部。库水位骤降下安全系数先降后升,降雨情况下安全系数先下降后保持稳定,单纯降雨导致的安全系数降幅要大于单纯库水位骤降情况,降雨发生在库水位骤降不同时刻下,安全系数在降雨时刻有一个突降,其中降雨发生在第 6~8 d 安全系数最小。降雨联合库水位骤降边坡失稳概率最大。库水位骤降速率越大浸润线越下凸,降雨强度越大边坡表层的湿润锋发展越充分,降雨与库水位联合作用下湿润锋变化规律相似,但是浸润线的下凸程度不同,这是导致这种情况下边坡安全系数不一致的原因。

**关键词:** 库水位变动;降雨;渗流特性;边坡稳定;数值模拟;蔡坡堆积体;三峡库区

中图分类号:TV139.1; P642.22

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)06-0194-07

## Study on seepage characteristics and slope stability of Caipo accumulation body in Three Gorges Reservoir area under combined rainfall condition

LI Xianfeng

(Department of Architectural Engineering, Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei 235000, China)

**Abstract:** At present, little attention has been paid to the seepage and stability of landslide under different combination of reservoir water level and rainfall. Based on the theory of unsaturated seepage and stability analysis, taking the Caipo accumulation body in the three Gorges Reservoir area as the research objective, the rainfall was analyzed by the Geostudio software. The seepage characteristics and stability of the accumulated slope under the reservoir water level and its combined working conditions were simulated by numerical simulation, and the variation of pore pressure in different parts of the slope, the safety factor curve of the slope and the development law of the wetting front were obtained. The results showed that the larger the drop rate of reservoir water level, the faster the pore pressure decrease, the greater the intensity of rainfall does, the larger the range of pore pressure rise, and the greater the amplitude of pore pressure rise of simple rainfall is greater than that of reservoir water level. The variation characteristics of pore pressure at the time of sudden drop of reservoir water level are combined with rainfall and reservoir water level. The safety coefficient of reservoir water level drops first and then rises. In case of rainfall, the safety coefficient drops first and then remains stable. The amplitude of safety coefficient caused by rainfall is larger than that of reservoir water level drop. Rainfall occurs at different times of reservoir water level. The safety coefficient has a sudden drop at the time of rainfall and arrives at minimum, of which rainfall occurs at the 6<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup> day. The

收稿日期:2019-05-08; 修回日期:2019-06-24

基金项目:安徽省质量工程项目“工程造价教学团队”(2016jxtd108)

作者简介:李险峰(1968-),男,安徽淮北人,硕士,副教授,主要研究方向为工业与民用建筑材料、施工、项目管理方面的研究及教学工作,土力学及应用方面的研究。

probability of slope instability is the highest when the water level suddenly drops in the combined rainfall reservoir. The water level of reservoir drops more rapidly. The greater the degree of degree, the fuller the progress of the wet front on the surface of the slope. The change law of the wetted front under the action of rainfall and reservoir water level is similar, but the degree of convex of the infiltration line is different, which is the reason for the inconsistent safety factor of the slope in this case.

**Key words:** reservoir water level variation; precipitation; seepage characteristics; slope stability; numerical simulation; Caipo accumulation body; Three Gorges reservoir area

## 1 研究背景

三峡库区地质条件复杂<sup>[1-2]</sup>,常年库水位的涨落及降雨导致库岸边坡土体强度参数降低,从而导致滑坡灾害的发生。库水位骤降导致上游水压力卸载<sup>[3]</sup>,边坡指向坡外的渗流力加剧<sup>[4]</sup>,降雨导致地下水位线升高,土体的有效应力降低<sup>[5]</sup>,这些都是导致边坡失稳的关键性因素。对于降雨或者是库水位变动下的滑坡稳定性,国内外已有许多学者开展了大量的研究工作,而研究内容大多集中于单轴降雨情况或单独库水位情况。降雨单独作用下的滑坡渗透稳定研究方面,叶帅华等<sup>[6]</sup>针对边坡体不同深度处基质吸力随雨水入渗的变化情况,建立了流固耦合计算模型,对降雨入渗条件下黄土高边坡的稳定性进行分析研究;王保林等<sup>[7]</sup>建立了含软弱夹层的黏性土坡二维有限元计算模型,对降雨入渗下的边坡渗透稳定性进行了数值模拟研究;郭友军等<sup>[8]</sup>对降雨条件下的煤系土边坡渗流特性及边坡安全系数变化规律进行了研究。单独库水位下降方面,张祖莲等<sup>[9]</sup>研究了汉江孤山枢纽工程区近坝滑坡在不同库水位骤降速率下的渗透稳定性规律;王力等<sup>[10]</sup>研究了库水位骤降情况下的动水压力型滑坡的稳定特性。针对于库水位联合降雨情况的研究,也多集中于降雨发生在库水位骤降结束时刻,如张罗送等<sup>[11]</sup>研究了降雨发生在库水位

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \frac{c'_i b_i + (W_i + P_i \cos \beta_i - u_a b_i) \tan \varphi'_i + (u_a - u_w) b_i \tan \varphi_b}{[1 + (\tan \varphi'_i \tan \alpha_i) / F_s] \cos \alpha_i}}{\sum_{i=1}^{n_s} W_i \sin \alpha_i - r_i P_i} \quad (2)$$

式中:  $F_s$  为边坡的安全系数,滑动面上的抗剪强度与实际产生的剪应力之比;  $c'_i$  为有效黏聚力, kPa;  $i$  为土条编号;  $W_i$  为质量, mg,  $P_i$  为水压力, kPa;  $\beta_i$  为倾角, ( $^\circ$ );  $u_a$  为孔隙气压力, kPa, 一般取为 0;  $b_i$  为土条宽度, m,  $\varphi'_i$  为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $u_w$  为孔隙水压力, kPa,  $\varphi_b$  为基质吸力贡献所对应的摩擦角, ( $^\circ$ )。

## 3 工程概况及计算模型

### 3.1 工程概况

图 1 为蔡坡堆积体全貌。该堆积体位于鹤峰县

骤降结束时刻下的滑坡稳定性规律。实际上,库水位骤降持续时间较长,而降雨持续时间较短,且降雨存在随机性,即可能发生在库水位骤降过程中的任何一个时刻,但是对于降雨发生在库水位骤降的不同时刻下的滑坡内部的渗流特性及稳定性规律却鲜有研究。

本文以三峡库区的蔡坡堆积体为工程背景,根据水库运行工况及气象条件,对降雨发生在不同库水位骤降速率下不同时刻的堆积体内部的渗流特性以及堆积体的安全系数变化规律进行了数值模拟,研究结果为全面认识降雨联合库水位骤降情况的规律及堆积体滑坡灾害的防护提供了一定的参考。

## 2 计算理论

### 2.1 非饱和计算原理

非饱和渗流微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c)] + Q = [C(h_c) + \frac{\theta}{n} S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $k_r$  为透水性;  $k_{ij}$  为渗透张量;  $k_{i3}$  为  $k_{ij}^s$  中  $j = 3$  时的渗透张量, m/d;  $h_c$  为水头, m;  $Q$  为源汇,  $m^3$ ;  $C(h_c)$  为容水度;  $\theta$  为水头函数;  $n$  为孔隙率;  $S_s$  为单位贮水量。

### 2.2 非饱和边坡抗滑稳定理论

非饱和边坡抗滑稳定理论如下所示:

燕子乡境内,在三峡库区坝址上游约 1.32 km 处,堆积体平面形态近似矩形,顺岸坡展布,西侧以纸厂沟为界,东侧延伸至库尾,地形坡角  $35^\circ \sim 40^\circ$ ,前缘高程约 1 070 m,后缘高程 1 120 m,总体东高西低。顺坡向长 170 m,顺溪坪河长 180 m,厚度一般为 2 ~ 4 m,总面积约  $1.2 \times 10^4 m^2$ ,体积约  $3.6 \times 10^4 m^3$ 。

### 3.2 计算模型及边界

图 2 为计算模型网格图。计算模型选取蔡坡堆积体典型剖面,正常蓄水位为 175 m,死水位为 145

m,对滑坡体所在的网格进行加密处理,整个模型一共划分成为1 689个节点,1 632个单元。同时,在滑体内部设置3个监测点(如图2所示)以反映边坡内部的不同点的孔压变化规律。



图1 蔡坡堆积体全貌图

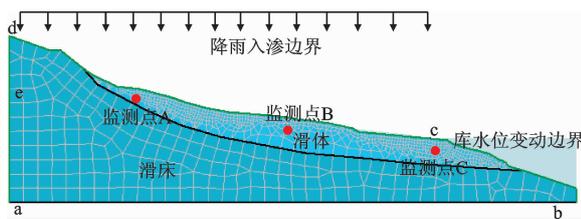


图2 堆积体计算模型及网格划分

模型的初始条件设置如下:以ae为185 m定水位边界,cd为175 m定水位边界计算所得的渗流场作为其他各个库水位联合降雨工况下的初始渗流场。

边界条件如下:ae边界为185 m的定水位边界,cd为库水位变动边界,水位的变动范围为175~145 m,dc为降雨入渗边界,其他边界则为不透水边界。

### 4 模型参数

滑床与滑体的材料物理力学参数根据室内试验

及现场勘测综合确定,滑床为灰绿色泥质粉砂岩,而滑体为粉质黏土夹碎块石层,参数值取试验的平均值。其中,滑坡与滑体的土水特征曲线根据Fredlund & Xing模型<sup>[13]</sup>进行拟定。

Fredlund等<sup>[13]</sup>于1994年提出了获取在负孔压变化范围为0到 $1 \times 10^6$  kPa下的土体体积含水量的闭合解法,控制方程如下:

$$\theta_w = C_\phi \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\phi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \tag{3}$$

式中: $\theta_w$ 为瞬时的土体体积含水率; $C_\phi$ 为修正函数; $\theta_s$ 为饱和土体体积含水率; $\phi$ 为负孔压,kPa; $a$ 为体积含水量拐点,kPa; $m$ 为控制残余含水量的无量纲参数; $n$ 为控制体积含水量函数的斜率的无量纲参数; $e$ 为自然数。

渗透系数函数如下所示:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N (\theta(e^y) - \theta(\psi)) e_i^y}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s \theta^0(e_i^y)}{e_i^y} \theta(e_i^y)} \tag{4}$$

式中: $k_w$ 为负孔压计算所得的瞬时渗透系数,m/d; $k_s$ 为饱和渗透系数,m/d; $y$ 为虚拟变量; $i$ 为数值间距; $j$ 为最小负孔压,kPa; $N$ 为最大负孔水压kPa; $\psi$ 为第*i*步负孔压,kPa; $\theta^0$ 为起始值,kPa; $e$ 为自然数。

因此,已知滑坡与滑体的饱和体积含水率,便可由Fredlund&Xing模型估算相应的土-水特征曲线。滑坡与滑体的物理力学参数如表1所示。土水特征曲线如图3所示。

表1 材料物理力学参数

序号	材料	$k_{sat}/(m \cdot d)^{-1}$	$\gamma_{sat}/(kN \cdot m^{-3})$	$c'/kPa$	$\varphi'/(\circ)$	$\varphi^b/(\circ)$	$\theta_s$
1	滑体	1.35	17.3	13.2	13.8	11	0.13
2	滑床	0.33	21.7	17.5	15.9	11	0.11

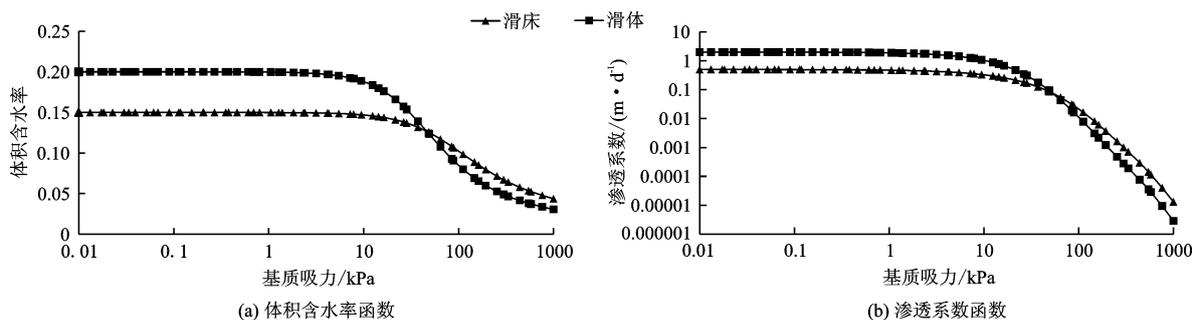


图3 滑坡体土-水特征曲线

## 5 模型工况

以往研究多将降雨与库水位作用单独分开,或者仅仅将降雨施加在库水位骤降的结束时刻进行相应的分析。然而事实上,库水位骤降过程与降雨历时相比更长,另外降雨具有随机性,降雨可能发生在库水位骤降的不同时刻,而这样的研究开展较少。因此,根据三峡库区多年的水文资料的收集,确定3个等级的降雨,即大雨(降雨强度为 $0.05 \text{ m/d}$ ),暴雨(降雨强度为 $0.1 \text{ m/d}$ )及特大暴雨(降雨强度为

$0.2 \text{ m/d}$ ),降雨的平均时长取 $2 \text{ d}$ 。同时根据三峡库区多年运行情况,取库水位骤降速率分别为 $0.5$ 、 $1.0$ 与 $1.5 \text{ m/d}$ 。具体工况如表2所示。

## 6 结果分析

### 6.1 监测点的孔压变化规律

图2中不同监测点的孔压变化规律见图4,为统一研究方便,将3个监测点孔压变化图的坐标轴的幅值设为相同。

表2 计算工况

工况编号	工况说明	库水位		降雨	
		库水位高程/m	库水位骤降速率/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	降雨强度/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	降雨时长/d
工况1	不同速率库水位骤降	175→145	0.5	0	0
			1.0		
			1.5		
工况2	不同降雨强度	155	0	0.05	0~2
			0	0.1	0~2
			0	0.2	0~2
工况3	降雨发生在库水位骤降不同时刻	175→145	1	0.2	0~2
					6~8
					12~14
					18~20
					24~26

由图4可见,库水位骤降情况下边坡内部水压持续下降,对于位于边坡上部的监测点(如监测点A),不同库水位骤降速率下不同工况的的孔压差异很小,而位于边坡下部的监测点(如监测点C),不同工况的孔压差异较边坡上部的监测点要大。库水位的下降速率越大,孔压的下降速率也越大。同时,位于边坡下部的孔压整体上数值要大于上部的监测点。

对于不同降雨强度而言,其孔压变幅要明显大于库水位骤降情况,可见降雨对于边坡内部含水率变化的影响要远大于库水位骤降的影响。降雨情况下边坡内部孔压经历一个先增大后稳定的过程,且降雨强度越大,孔压的升幅越大。同样,与工况1相似,位于下部的点的孔压整体上要高于上部点。

对于降雨发生在库水位骤降的不同时刻情况,孔压变化则是综合了库水位骤降及降雨的综合特性。即孔压整体上呈现下降的规律,但是在降雨时刻由于降雨的原因孔压在该时刻有个突升的过程,在整个孔压变化过程中呈现一个个单峰的规律。值

得注意的是,位于边坡上部的点,库水位骤降导致的孔压变幅小,但是降雨导致的孔压变幅较大;而位于边坡下部的点,库水位骤降导致的孔压变幅较大,但是降雨导致的孔压变幅则相对较小。

### 6.2 边坡稳定性分析

不同工况下的边坡安全系数变化规律,见图5。其中图5(a)为单纯库水位骤降的安全系数变化规律,图5(b)为不同降雨强度下的安全系数变化,而图5(c)为库水位骤降叠加不同时刻发生的降雨情况下的安全系数规律。

由图5可以发现,库水位骤降工况安全系数是先降后升,降雨工况则是在降雨时刻骤降而后维持稳定,库水位骤降叠加不同时刻降雨则是综合了降雨与库水位的综合性质,即安全系数整体上先降后升,在降雨发生的时刻安全系数有个突然的跌落过程。其中,安全系数降幅与库水位骤降速率成负相关,但是总体上而言库水位骤降工况的安全系数变幅较小,不同库水位骤降速率下(库水位骤降速率

0.5、1 以及 1.5 m/d) 情况下的安全系数最大降幅分别为 5.3%、6.4% 与 7.1%。不同降雨强度情况下(降雨强度为 0.05、0.1 和 0.2m/d),安全系数的最大降幅为 6.3%、7.5% 及 8.8%,可见降雨对于安

全系数的变幅影响要大于库水位骤降因素,同时可以发现,库水位骤降的最小安全系数也要大于降雨情况。但是最小安全系数都处于 1.25 以上,可以认为边坡基本处于稳定状态。

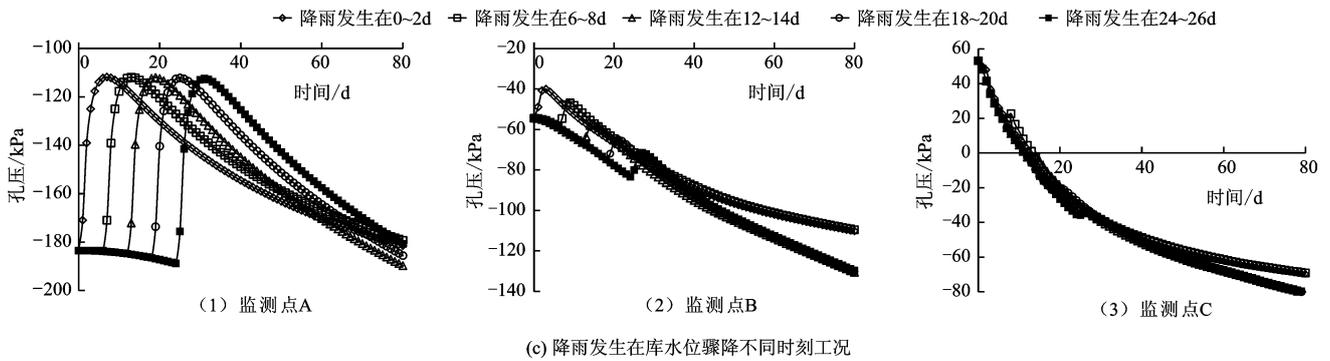
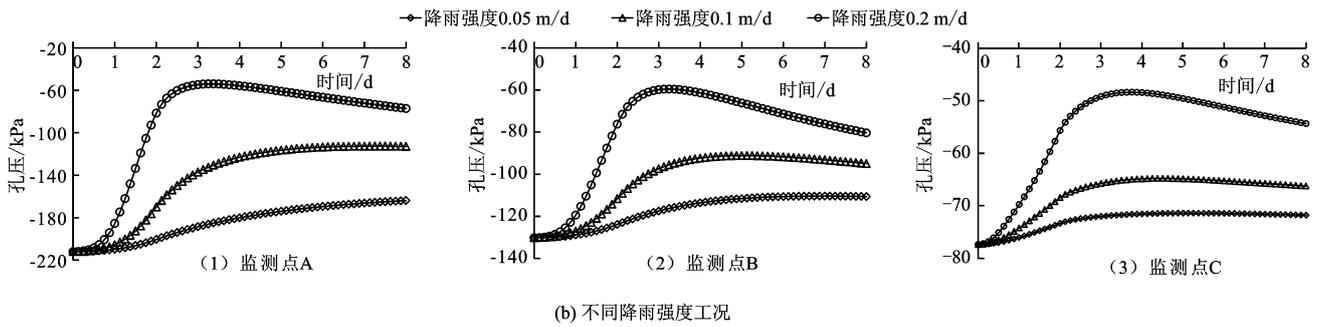
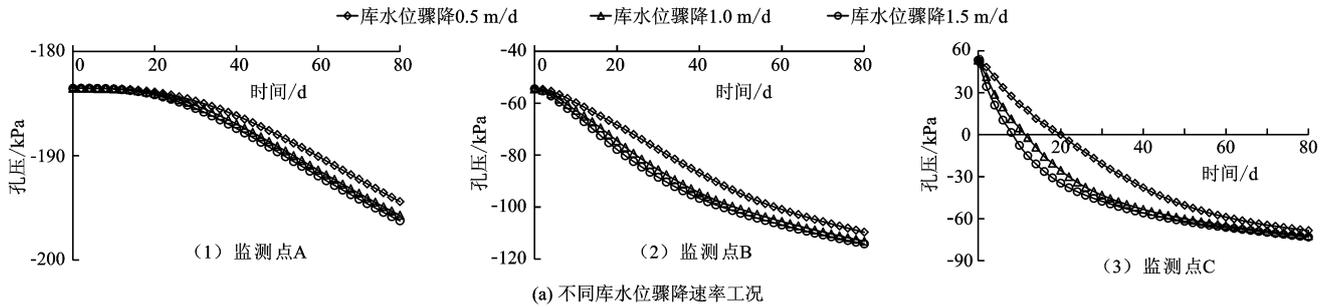


图 4 不同工况的孔压变化图

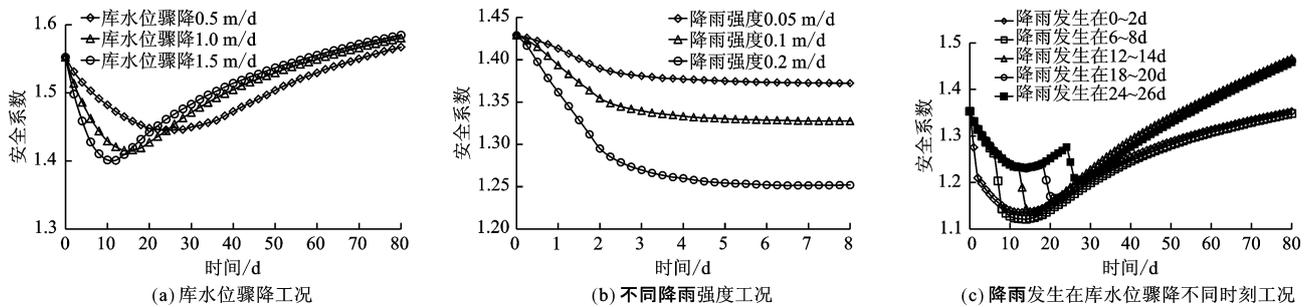


图 5 不同工况下的边坡安全系数变化规律

对于降雨发生在库水位骤降不同时刻,规律则有所不同,降雨发生在 0~2、6~8、12~14、18~20、24~26 d 情况下,安全系数的最大降幅分别为 13.8%、16.3%、14.2%、12.6%、10.7%,可见此工

况下安全系数的最大降幅都要大于单纯库水位骤降或者是降雨情况,同时最小安全系数均小于 1.25,表明此时边坡安全稳定具有较大的失稳风险。由此可以看出降雨联合库水位骤降是滑坡产生失稳的重

要原因。值得注意的是,降雨发生在库水位骤降不同时刻下的最小安全系数也不一样,降雨发生在第 6~8 d 的最小安全系数最小。以往研究仅仅把降雨施加在库水位骤降结束时刻,而本研究发现降雨发生在库水位骤降过程中会出现最小安全系数。

### 6.3 降雨入渗孔压等值线分析

根据以往的研究<sup>[14]</sup>,降雨入渗区域可以分为 4 个部分,即饱和区、过渡区、传导区与湿润区,湿润锋则为非饱和区与非饱和区的交界处,如图 6 所示<sup>[15]</sup>。

由图 6 可见,在降雨过程中,土体表面会形成暂态饱和区,往下为非饱和区,且随着时间的推移,暂态饱和区与非饱和区不断深入土体内部,影响土体的强度参数与有效应力。本节将给出在安全系数最小时的边坡整体的湿润锋等值线图,以探究边坡在库水位

与降雨联合作用下的机理,同时为对比研究,将单纯库水位骤降下的孔压图一并给出,如图 7 所示。

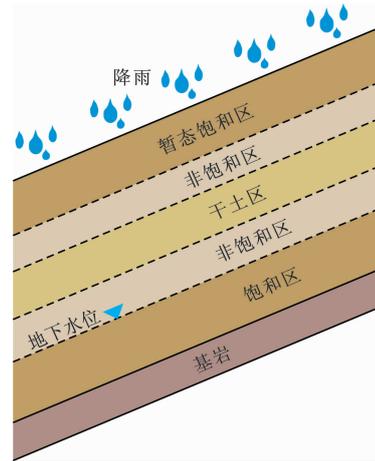


图 6 降雨入渗边坡土体区域划分<sup>[15]</sup>

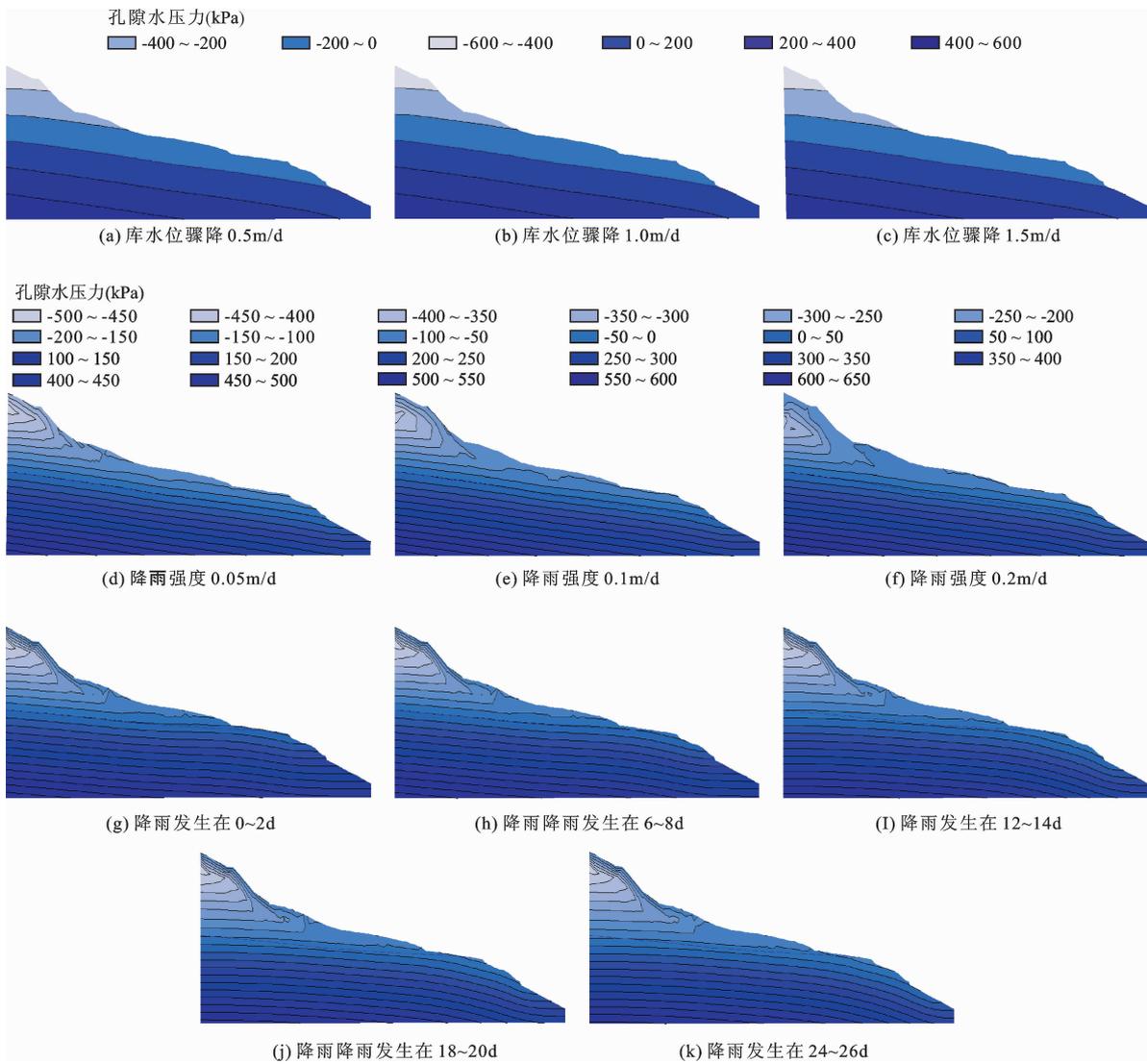


图 7 不同工况下安全系数最小时的堆积体孔隙水压力等值线图

由图7可见,对于库水位骤降工况而言(图7(a)~7(c)),库水位骤降速率越大,浸润线下凸越明显,因而指向边坡外的下滑力越大,边坡的最小安全系数越小。

对于不同降雨强度工况而言(图7(d)~7(f)),降雨强度越大,湿润锋进展得越充分,体现在边坡表面浅色区域的面积越大,因而降雨强度越大,边坡的最小安全系数则越小。值得注意的是,降雨情况下的边坡上部孔压要明显小于下部(体现出边坡上部的“疏干”作用),这与本文6.1节中的分析一致。

对于降雨发生在库水位下降的不同时刻(图7(g)~7(k)),边坡表层的湿润锋无太大差别(降雨强度及持时一样),但是浸润线的下凸程度不一致,降雨发生在第6~8d的浸润线要明显比其他情况下凸更明显,这是因为库水位骤降6~8d时正好经过一个较为陡的坡,因此这种情况的安全系数最小。

## 7 结 论

(1)库水位骤降速率越大,则孔压下降越快;降雨强度越大,则孔压上升幅度越大。单纯降雨孔压上升幅度要大于库水位骤降情况孔压下降幅度。降雨发生在库水位骤降时刻的孔压变化特性综合了降雨情况与库水位骤降情况,位于边坡下部的孔压值要大于上部。

(2)库水位骤降下安全系数先降后升,降雨情况下安全系数先下降后保持稳定,降雨导致的安全系数降幅要大于库水位骤降情况,降雨发生在库水位骤降不同时刻下,安全系数在降雨时刻有一个突降,其中降雨发生在第6~8d安全系数最小。降雨联合库水位骤降边坡失稳概率最大。

(3)库水位骤降速率越大则浸润线越下凸,降雨强度越大则边坡表层的湿润锋进展越充分。降雨与库水位联合作用下湿润锋变化规律相似,但是浸润线的下凸程度不同,这是导致这种情况下边坡安全系数不一致的原因。

## 参考文献:

- [1] 汤明高,杨何,许强,等. 三峡库区滑坡土体渗透特性及参数研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):325-332.
- [2] 王如宾,夏瑞,祁健,等. 水动力型滑坡堆积体渗流稳定性数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(2):50-54.
- [3] 李茜莎,谭雅文. 库水位骤降边坡渗透稳定敏感性分析[J]. 人民黄河,2019,41(3):140-144+149.
- [4] 仇文岗,王尉,高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(1):21-26.
- [5] 张馨文,田斌,卢晓春,等. 金沙水电站坝肩绕曲边坡稳定性及其影响因素研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(3):21-25.
- [6] 叶帅华,时铁磊. 降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1648-1656.
- [7] 王保林,何忠明,胡庆国,等. 降雨工况下不同软弱夹层出露面对黏性土坡稳定性影响分析[J]. 中外公路,2017,37(6):15-19.
- [8] 郭友军,朱自强,席飞雁. 降雨作用下煤系土边坡数值模拟[J]. 中国科技信息,2019(7):88-89.
- [9] 张祖莲,梁谏杰,黄英,等. 库岸边坡倾角及水位变化对红土型库岸稳定性影响研究[J]. 山地学报,2019,37(1):62-69.
- [10] 王力,王世梅. 库水位骤降条件下动水压力型滑坡稳定性分析[J]. 水电能源科学,2018,36(12):117-120.
- [11] 张罗送,刘杰,孙涛,等. 降雨及库水位联合作用下滑坡稳定性评价与治理措施合理性研究[J]. 价值工程,2019,38(1):111-114.
- [12] GEO-SLOPE International Ltd. Seepage modeling with SEEP/W 2007 [M]. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd., 2010.
- [13] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4):521-532.
- [14] BODMAN G B, COLMAN E A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, 8:116.
- [15] 张建,李江腾,林杭,等. 降雨触发浅层坡体失稳的迟滞现象及其与土质参数的关联性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):150-157.