

三峡水库泄水期间类土质岸坡渗流驱动压剪破坏机制研究*

周云涛^{1,2}, 唐红梅³, 陈洪凯³

(1. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都 611734;
3. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:基于水库水位降落期间渗流驱动力对类土质岸坡的压剪作用,建立了类土质岸坡渗流驱动压剪力学模型,改进了水库水位降落期间渗流驱动力的计算方法,提出了渗流驱动压剪破坏判据。以三峡水库青石岸坡为例,渗流驱动压剪破坏机制可以解释青石岸坡水位降落期间的破坏现象。此外还探讨了水库水位降落速度、时间以及初始水位高度对渗流驱动力与岸坡稳定性的影响,并得出如下结论:渗流驱动力随水库水位降落速度的增加而非线性增大;渗流驱动力随初始水位高度增加呈现为线性降低的趋势;青石岸坡稳定系数不随水位降落速度、水位降落时间的变化而变化。

关键词:岩土力学;渗流驱动力;压剪破坏;类土质岸坡;三峡水库

中图分类号:U412.22⁺2;U416.1⁺4

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)06-0037-08

自2003年三峡水库蓄水以来,因水位降落而形成渗流继而引发的地质灾害不断,如2003年的秭归县千将坪滑坡和马家沟滑坡、2005年开县井泉滑坡、2009年云阳县凉水井滑坡、2010年神女溪青石滑坡等,岸坡地质灾害频发,造成人员伤亡和重大经济损失。研究渗流引发的岸坡破坏问题对于三峡库区地质减灾不仅具有重大现实意义,而且还具有一定的紧迫性。

水库放水产生的岸坡渗流破坏问题一直是岩土工程界的热点,国内外学者取得了大量研究成果,如 Shiva-kumar 等人^[1]认为在土质坝的设计中必须考虑边坡和渗流的双重稳定性;Mohammed 等人^[2]进行了引水渠的数值模拟及现场试验,得出基质吸力对水土特征曲线特别敏感;Saada 等人^[3]通过动力有限元程序解决了浸水岩质边坡的稳定性问题,解释了由过饱和孔隙水压力在边坡中引起的渗流效应;Vandamme 等人^[4]提出一种新的陡坡形迹颗粒元模型,该模型能够较好地研究由渗流引起的基质吸力和水力改变的情型;Özer 和 Akay^[5-6]研发了一种由渗流引发的岸坡破坏的修复技术,为岸坡修正提供了技术保证。在国内,刘博等人^[7]通过二次开发模拟得出非饱和土相对渗透系数与基质吸力关系曲线对库岸边坡的浸润面位置和安全系数影响较大的结论;吴爱祥等人^[8]通过毛细试验得到,在驱动力的作用下浸润初期的液面上升速度较快,浸润后期液面上升较为平缓;杨春宝等人^[9]通过粉土边坡离心模型试验得出,当坡内水位超过1/3坡高后,在坡内渗流作用下,粉土边坡呈现逐级侵蚀剥落、从坡脚向坡顶、由浅层向深层的多级滑坡失稳模型;于玉贞等人^[10]认为 Bishop 和 Fredlund 非饱和土抗剪强度公式在强度折减法应用的本质是相同的;毛昶熙等人^[11]系统叙述了渗流产生的破坏力“浮力”和“渗透力”,并讨论了渗流力之间相互转换关系及其在管涌滑坡中的应用;陆彦等人^[12]基于水槽试验和理论分析,推导出临界稳定坡度与渗流水力梯度的关系;俞伯汀等人^[13]对含碎石粘性土边坡物理模型试验表明,土体渗透系数在管道排泄系统中先减小后增大,最后趋于稳定,为边坡渗流破坏提供理论依据;张文杰等人^[14]考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度及岸坡安全系数的贡献,表明土体的饱和渗透系数和土水特征曲线共同决定了水位升降过程中岸坡内孔隙水压力的大小和分布;高小育等人^[15]根据 Biot 固结理论和孔隙水连续性原理,建立了应力场和渗流场耦合有限元方程,对边坡工程的防控具有一定的参考价值;徐东强等人^[16]推导了透水边坡在地下水渗流条件下边坡稳定系数的解析表达式,采用非线性规划中的变尺度方法,得出最危险圆弧滑动面的位置;张永生等

* 收稿日期:2015-09-07 修回日期:2016-03-31 网络出版时间:2016-11-02 13:25

资助项目:国家自然科学基金(No. 51378521);重庆市自然科学基金重点项目(No. cstc2013jjB005);国土资源部公益性行业科研专项项目(No. 201511051);中国地质调查项目(No. DD2016278)

作者简介:周云涛,男,研究方向为岩土工程地质减灾及控制技术,E-mail:zhouyuntao_13@sina.com;通信作者:唐红梅,女,教授,E-mail:hmtang6778@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20161102.1325.008.html>

人^[17]用抗剪强度折减弹-塑性有限元法研究了渗流作用下土质边坡的稳定性问题,为复杂情况下的土质边坡结构设计提供了依据。

类土质岸坡由一种特殊的土石混合物构成,此土石混合物称为类土质土体,主要特征为级配粒径差异大,级配曲线分区明显,常常含有大块碎石和极细小的粘土颗粒,大块碎石粒径差异不大,粘土颗粒粘附于大块石表层或填充在碎石之间的空隙中。针对三峡库区类土质岸坡在库水下降过程中的破坏问题,通过理论推导得出岸坡渗流力精细化计算方法,包括渗流驱动压剪模型和渗流驱动力计算表达式,进而给出岸坡压剪破坏判据,探讨不同库水位降落速度、初始水位高度以及水位降落时间对类土质岸坡渗流驱动力及稳定的影响,该研究成果能有效论理三峡库区类土质岸坡灾情发育特征及破坏力学机制。

1 类土质岸坡渗流驱动压剪模型

1.1 力学模型

通过对库水位上升期间类土质岸坡的研究发现,受库水位上升浸泡软化作用,坡脚区域类土质土体发生沉降变形,类土质岸坡后缘形成拉裂缝,并进一步扩展为潜在破裂面,如图 1 所示。三峡库区运行调度规程可知,当库水位上升并稳定一定时限后为迎接汛期库水位将降落,当库水位从 h_1 (单位:m) 下降到 h_2 时,由于渗流的滞后效应^[18],会在岸坡体内形成渗流自由面,又称为浸润线。浸润线以下类土质土体为饱和状态,以上为天然状态,坡体重度计算时不考虑类土质土体的毛细作用,同时,浸润线以下,库水位下降在岸坡体内存在水力梯度,当岸坡类土质土体渗透系数较低时,坡体将受到渗流驱动力的作用。由图 1 可知,岸坡平均高度为 H (单位:m);平均宽度为 b (单位:m);岸坡潜在破裂面的平均角度为 β (单位:°)。类土质岸坡受自重 W 、水平地震力 P_L 以及渗流驱动力 D 作用。其中自重 W 为

$$W = \gamma b H, \tag{1}$$

水平地震力为

$$P_L = \mu W = \mu \gamma b H. \tag{2}$$

以上式中, γ 为类土质土体重度(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); μ 为水平地震力系数。

1.2 渗流驱动力计算

图 2 为类土质岸坡渗流驱动示意图,将库水位下降过程考虑为潜流,由 Dupuit 公式^[19]得渗流区域岸坡体内任一竖截面的单宽流量 q_x (单位: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 为:

$$q_x = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l}. \tag{3}$$

其中 k 为类土质体渗透系数, l 为渗流路径水平投影长度(单位:m)。由 Darcy 定律知:

$$q_x = KJA = KJ(h_x - b_x). \tag{4}$$

其中 J 为水力梯度, A 为垂直渗流方向的流经面积(单位: m^2)。因此

$$q_x = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l} = KJ(h_x - b_x). \tag{5}$$

整理得出关于渗流区域岸坡体内任一竖截面的水力梯度为:

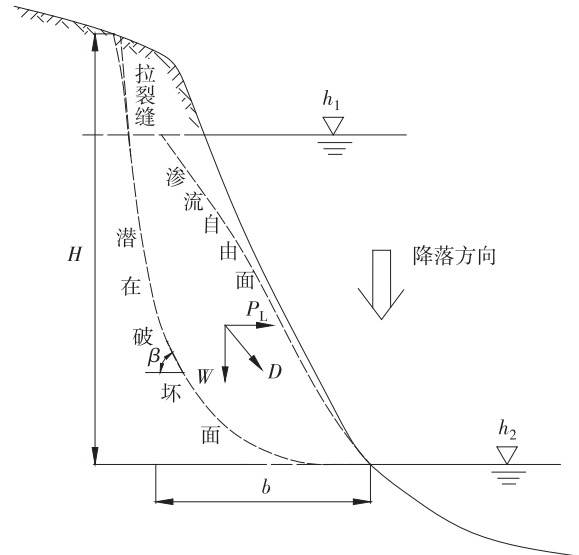


图 1 类土质岸坡力学模型

Fig. 1 Mechanical model of the quasi earthy bank slope

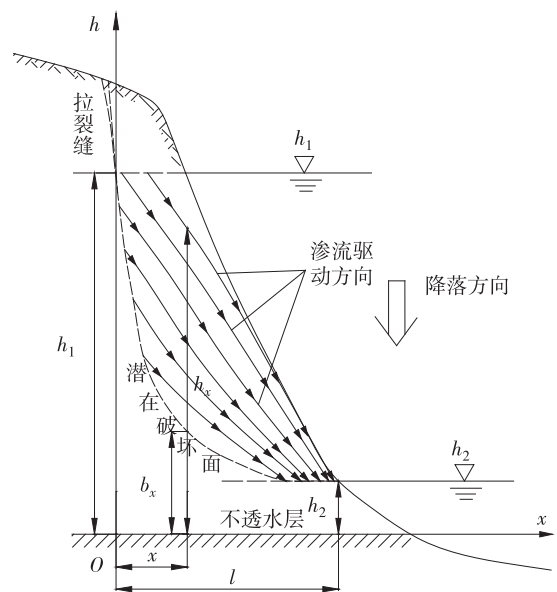


图 2 类土质岸坡中的渗流驱动

Fig. 2 Seepage-driving force in the quasi earthy bank slope

$$J = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l(h_x - b_x)} \quad (6)$$

进而可得任一竖截面的的渗流应力 D_p 为:

$$D_p = \rho g J = \frac{\rho g (h_1^2 - h_2^2)}{2l(h_x - b_x)} \quad (7)$$

为考虑库水位降落速度与渗流应力的关系,设 v_s 为库水位降落速度(单位: $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$),则在时间 t (单位: d) 内有

$$h_2 = h_1 - v_s t, \quad (8)$$

将(8)式带入(7)式得:

$$D_p = \rho g J = \frac{\rho g (2v_s h_1 t - v_s^2 t^2)}{2l(h_x - b_x)} \quad (9)$$

显然,(9)式是岸坡体内任一截面的渗透应力,为求解岸坡体内的渗流驱动力,令

$$b_x = f(x), \quad (10)$$

$$h_x = g(x). \quad (11)$$

其中, b_x 为潜在破裂面关于 x 的函数; h_x 为渗流自由面(浸润线)方程,由潜水的稳定运动方程知:

$$h_x = g(x) = h_1^2 + \frac{h_2^2 - h_1^2}{l} x. \quad (12)$$

因此,(9)式可以改写为下式,即:

$$D_p = \rho g J = \frac{\rho g (2v_s h_1 t - v_s^2 t^2)}{2l(g(x) - f(x))}, \quad (13)$$

则渗流驱动力为:

$$D = \int_0^l D_p dx = \int_0^l \frac{\rho g (2v_s h_1 t - v_s^2 t^2)}{2l(g(x) - f(x))} dx. \quad (14)$$

至此,建立了考虑库水位降落速度、降落时间、库水位初始高度、浸润线方程以及岸坡潜在破裂面方程的渗流驱动力模型。

2 岸坡渗流驱动压剪破坏判据

如图 1 所示,将类土质岸坡所受的 W , P_L 以及 D 沿潜在破裂面方向分解,分别得到平行于破裂面的切向力 T 和垂直于破裂面的法向力 N 分别为:

$$T = P_L \cos\beta + W \sin\beta + D \sin(\beta - \theta), \quad (15)$$

$$N = P_L \sin\beta - W \cos\beta - D \cos(\beta - \theta). \quad (16)$$

则作用于潜在破裂面上的抗滑力 τ_f 为:

$$\tau_f = \sigma \tan\varphi + c = N \tan\varphi / l_1 + c, \quad (17)$$

下滑力 τ 为:

$$\tau = T / l_1. \quad (18)$$

进而可的渗流驱动压剪破坏判据为:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{N \tan\varphi + c l_1}{T}, \quad (19)$$

将(15)式和(16)式带入(19)式得

$$F_s = \frac{[P_L \sin\beta - W \cos\beta - D \cos(\beta - \theta)] \tan\varphi + c l_1}{P_L \cos\beta + W \sin\beta + D \sin(\beta - \theta)}. \quad (20)$$

以上式中, θ 为渗流驱动力与水平方向的夹角(单位: $^\circ$); φ 为潜在破裂面内摩擦角(单位: $^\circ$); c 为潜在破裂面粘聚力(单位: kPa); l_1 为潜在破裂面长度(单位: m).

从(20)式易知,岸坡在 W , P_L 以及 D 作用下处于压剪状态:当 $F_s < 1$ 时,岸坡在渗流驱动力作用下发生压剪破坏;当 $F_s = 1$ 时,岸坡处于临界状态;当 $F_s > 1$ 时,岸坡处于稳定状态。

3 青石类土质岸坡渗流驱动压剪破坏机制验证及讨论

3.1 青石类土质岸坡概况

青石村岸坡区域地处渝东大门巫山县,神女溪右岸,距长江口约 2 km,距巫山县城 20 km,是三峡库区重庆市首淹首迁县。岸坡区域位于大巴山弧形构造、川东南褶皱带及川鄂湘黔褶皱带三大构造体系结合部,长江横贯东西,大宁河、抱龙河等 7 条支流呈南北向强烈下切;地貌上呈深谷和中低山相间形态,地形起伏大,坡度陡;岩层软硬相间,次级褶皱及断裂构造十分发育,构造地质背景十分复杂,工程地质条件极差。区内属于亚热带湿润气候,气候温和,雨量充沛,多年平均降雨量 1 087.4 mm。降雨主要集中于 5~9 月,占全年降雨量的 68.8%,而 1,2 月份降雨量仅占全年的 4.3%,由于降雨集中,常诱发危岩、滑坡、泥石流等地质灾害。

青石类土质岸坡主要由土石混合物组成,表面呈黄色。受雨水冲刷和库水位渗流驱动作用,细小土颗粒被带走,大块石含量较多。室内筛分试验得出,细颗粒通常小于 2 mm,而大块石通常在 1~5 cm 之间,级配曲线出现间断,表现出明显的级配不良。经测定,土和石的分界粒径为 2 mm,土石比为 19:81。而对于均质土、岩体或碎石土,均质土颗粒基本相同,岩体整体性较好,而碎石土通常级配曲线不间断,表现为明显的连续性。

根据变形破坏特征可将青石岸坡分为 3 个区域,即坡前塌岸区、滑坡区和潜在崩滑区(图 3)。

前缘垮塌区(图 4):位于青石岸坡前缘,受库水位升降作用发生突发性垮塌,长仅 50 m,宽约 200 m,塌岸上部呈锯齿状,表层裸露强风化堆积物。

滑坡区:位于神女溪近岸边,潜在崩滑区的前缘。滑坡平面呈蚌壳状,后缘受地形和变形裂缝控制,呈圆弧放射状展开,后缘高程 312~322 m;两侧也以变形裂缝为界,属大型深层牵引式类土质滑坡,主滑方向 26°。

潜在崩滑区:平面呈箕形,后缘受地形特征控制,沿陡崖近东西向展布,前缘位置与滑坡体的剪出口相同,两侧边界以冲沟为界。平均宽度约 600 m,平均纵长约 825 m,后缘高程 550 m 左右。滑坡主滑方向 30°,预计土层平均厚度 50 m,分布面积 $4.95 \times 10^5 \text{ m}^2$,体积 $2.475 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

3.2 渗流驱动压剪破坏机制验证

以青石岸坡滑坡区为研究对象,将表 1 参数带入(1)~(20)式,计算得到青石岸坡在天然状态下的稳定系数为 1.26,而在 175~159 m 水位变动下渗流驱动力为 2 029.02 kN,稳定系数为 1.023,岸坡稳定系数显著降低,虽然岸坡稳定系数仍大于 1,但安全储备不足,仍需要进行永久性工程治理。

表 2 为青石岸坡滑坡区域变形监测数据,从表 2 中可以看出,岸坡在高水位条件下,175 m 水位降低至 168.2 m 水位,水位差仅 6.8 m,但滑坡区后缘出现了多条裂缝,并伴随着裂缝的加宽加深,同时青石岸坡滑坡区域沿滑面发生错动。因此,库水位降落产生的渗流驱动力加剧了青石岸坡的破坏。

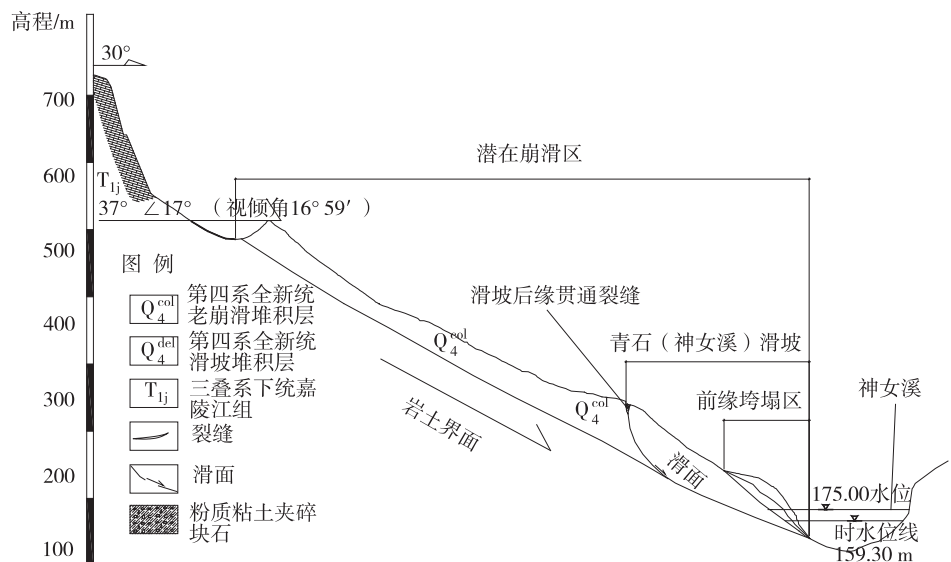


图 3 青石岸坡剖面图

Fig. 3 Qingshi bank slope profile map



图 4 青石岸坡前缘垮塌

Fig. 4 The collapse in the lip of Qingshi bank slope

表 1 青石岸坡物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of Qingshi bank slope

总面积/ m ²	容重/ (kN · m ⁻³)	饱和容重/ (kN · m ⁻³)	滑面倾角 $\beta/(\text{°})$	滑面长度 l_1/m	水平投影长度 l/m	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	水平地震力 系数 μ
9 300.0	18.50	19.50	33.50	321.50	54.51	11.20	35.00	0.025

表 2 青石岸坡变形监测

Tab. 2 Deformation monitoring of Qingshi bank slope

时间	高程/m	水位/m	裂缝/条	裂缝宽度/m	裂缝深度/m	下错深度/m
2010-10-05	330~550	175.0	1	0.01~0.02	0.2~0.5	0.1
2010-10-11	330~550	169.4	1	0.10~0.20	0.4~0.6	0.2~0.6
2010-10-18	330~550	170.0	2	0.20~1.20	1.0~4.0	0.1~1.0
2010-10-26	330~550	172.0	2	1.50	—	1.0
2010-11-09	330~550	168.2	5	2.00~4.50	2.0~5.0	1.5~5.4

3.3 渗流驱动力及岸坡渗流稳定变化规律

为了研究渗流驱动对岸坡的压剪作用,分别考虑不同库水位降落速度、时间以及初始水位高度 3 个因素研究渗流驱动力与岸坡稳定性变化规律。

3.3.1 不同库水位降落速度渗流驱动力变化规律 研究发现^[20],库水位降落速度直接影响岸坡稳定性。水位下降将在岸坡体内水位高差之间形成水力梯度,水力梯度是渗流力的一次函数,形成的渗流驱动力作用于岸坡体,加剧了岸坡的危险性。为了研究库水位降落速度对渗流驱动力的影响,考虑三峡库区常用库水位调度速度 0~4 m · d⁻¹,将表 1 中的参数带入到(14)式得到图 5 渗流驱动力随库水位降落速度变化曲线。

由图 5 可知,渗流驱动力整体随库水位降落速度的增加而增大,曲线为凹形,且增大幅度随着水位降落速度的增大而增大;水位降落速度较小时,渗流驱动力随降落速度缓慢增加,随着水位降落速度的进一步增大,渗流驱动力增幅加大,表明较大的水位降落速度将加剧渗流驱动力的产生。前述提到,类土质土体是由大块碎石和极细小的粘土颗粒组成的土石混合物。当水位降落速度较小时,水流沿着类土质土体原始孔隙运动,而类土质土体自身的滞后效应,导致水流运动速度缓慢,形成不了较大的渗流驱动力。随着水位降落速度进一步增大,类土质土体中的极细小的粘土颗粒被水运移带走,类土质土体内孔隙逐渐连通形成细小水流管道,降低了对水流的阻碍作用。因此,在水位降落速度较小时,出现了较小的渗流驱动力,并且呈缓慢增大的趋势;当水位速度进一步加大,由水流在类土质土体中形成的细小管道扩宽,继续与其他孔隙连通,更多的粘土颗粒被运移带走,随着粘土颗粒被带走的量越多,孔隙连通性越好,同时对水流的阻碍也逐渐减小,呈现出渗流驱动力不断增大并且增长斜率不断增加的现象。

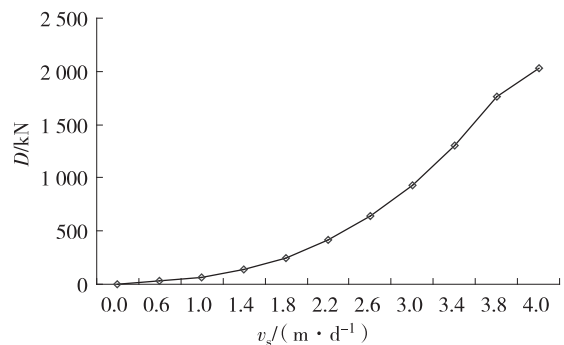


图 5 渗流驱动力随水位降落速度变化曲线

Fig. 5 The curve of seepage-driving force with the water level falling velocity

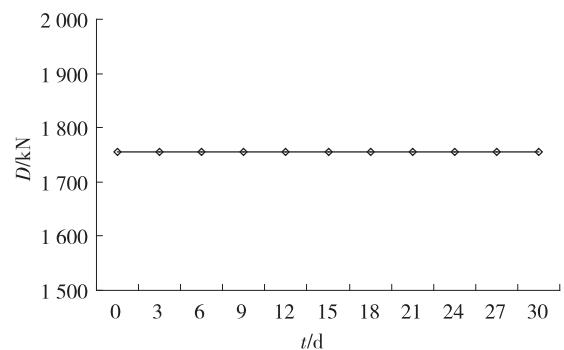


图 6 渗流驱动力随水位降落时间变化曲线

Fig. 6 The curve of seepage-driving force with the water level falling time

3.3.2 不同库水位降落时间渗流驱动力变化规律 由图 6 可知,渗流驱动力随着库水位降落时间不变,呈一条水

平直线。这是因为一旦库区高水位高度和低水位高度以及降落速度确定,在任何时间下水位降落不会发生变化,因此,对于不同的水位降落时间,渗流驱动力是不变的。

3.3.3 初始库水位高度对渗流驱动力的影响 青石岸坡库水位变动在 159~175 m 之间,考虑水位在此区间变动得到图 7。由图 7 可知,渗流驱动力随初始水位高度增加呈现为线性降低趋势。由(12)式可知,渗流浸润线为双曲线,曲线沿坡面逐渐降低并且斜率不断增大,因此浸润线降低加快,这就导致在相同时间、相同降落速度条件下,初始水位越低,浸润线在坡体内越陡,即水力梯度越大,相应地,渗流驱动力越大,因此,呈现出图 7 渗流驱动力随初始水位高度逐渐降低的趋势。同时,在图 7 中还可以得知,库水位从 159 m 增加到 175 m,渗流驱动力仅改变了 30 kN,因此,初始水位高度对渗流驱动力的影响是有限的。

3.3.4 岸坡稳定性随水位降落速度变化规律 将图 5 得到的随水位降落速度变化的渗流驱动力带入式(20)得到图 8 稳定系数随水位降落速度变化曲线。经分析得出以下结果:

1) 青石岸坡稳定系数随水位降落速度增加非线性降低,曲线呈凸形,稳定性系数前期缓慢降低,后期降低趋势显著;

2) 稳定系数随水位降落速度变化曲线与渗流驱动力随水位降落速度曲线具有较好的对应性,如图 5 渗流驱动力前期缓慢增加,后期快速增大,而稳定系数前期缓慢降低,后期降低显著。

3.3.5 岸坡稳定性随降落时间变化规律 将图 6 得到的随水位降落时间变化的渗流驱动力带入式(20)得到图 9 稳定系数随水位降落时间变化曲线。图 9 可知,岸坡稳定系数随水位降落时间稳定在 1.05,且水位降落时间对岸坡稳定性无影响。

4 结论

1) 基于库水位降落期间渗流驱动力对类土质岸坡的压剪作用,建立了类土质岸坡渗流驱动压剪力学模型,改进了库水位降落期间岸坡渗流驱动力计算方法,确定了类土质岸坡渗流驱动压剪破坏判据。

2) 以青石岸坡为例,验证得出渗流驱动压剪破坏机制与青石岸坡水位降落期间的破坏较为吻合,并探讨了库水位降落速度、时间以及初始水位高度对渗流驱动力

与岸坡稳定性的影响,得出以下结论:渗流驱动力随库水位降落速度的增加非线性增大,较大的水位降落速度将对渗流驱动力产生显著影响;水位降落时间初期对渗流驱动力影响不大,后期对渗流驱动力影响较大;渗流驱动力随初始水位高度增加呈现为线性降低趋势;岸坡稳定系数随水位降落时间不变。

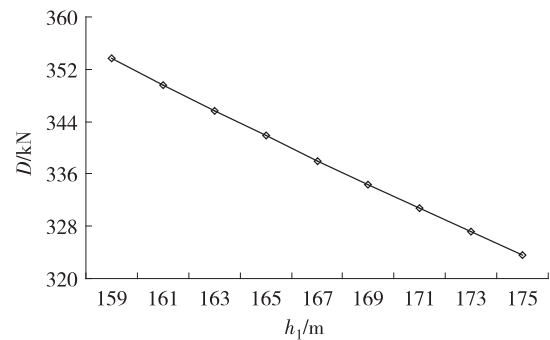


图 7 渗流驱动力随初始水位高度变化曲线

Fig. 7 The curve of seepage-driving force with the initial water level

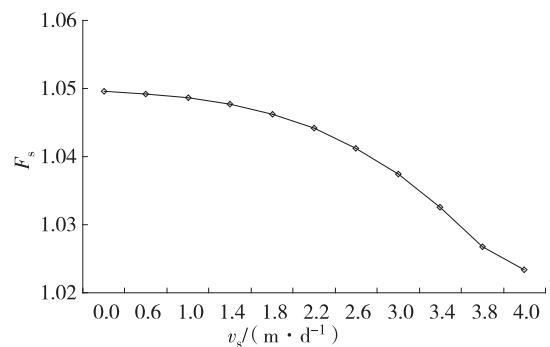


图 8 稳定系数随水位降落速度变化曲线

Fig. 8 The curve of stability coefficient with the water level falling velocity

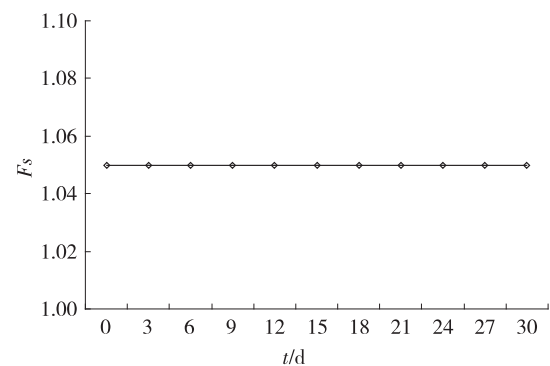


图 9 稳定系数随水位降落时间变化曲线

Fig. 9 The curve of stability coefficient with the water level falling time

参考文献:

- [1] Shivakumar S A, Shivamant, Solanki C H, Dodagoudar G R. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 876-883.
- [2] Mohammed A A, Toker N K, Nejan H. Prediction of seepage and slope stability in a flume test and an experimental field case[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9: 189-194.
- [3] Saada Z, Maghous S, Garnier D. Stability analysis of rock slopes subjected to seepage forces using the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55: 45-54.
- [4] Johan V, Zou Q P. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48: 9-20.
- [5] Özer A T, Onur A, Garey A F, et al. A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofam[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(2): 166-180.
- [6] Onur A, Özer A T, Garey A F, et al. Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofam under seepage flow[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 37: 81-98.
- [7] 刘博, 李江腾, 王泽伟, 等. 非饱和土渗流特性对库岸边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(2): 515-520.
- Liu B, Li J T, Wang Z W, et al. Influence of seepage behavior of unsaturated soil on reservoir slope stability[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2014, 45(2): 515-520.
- [8] 吴爱祥, 李希雯, 尹升华, 等. 矿堆非饱和渗流中的界面作用[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 844-849.
- Wu A X, Li X W, Yin S H, et al. Interface effects of unsaturated seepage in dump leaching[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(7): 844-849.
- [9] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261-1271.
- Yang C B, Zhu B, Kong L G, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1261-1271.
- [10] 于玉贞, 林鸿州, 李荣建, 等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2892-2998.
- Y Y Z, Lin H C, Li R J, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2892-2998.
- [11] 毛昶熙, 段祥宝. 关于渗流的力及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1569-1574.
- Mao C X, Duan X B. On seepage forces and application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1569-1574.
- [12] 陆彦, 陆永军, 张幸农. 河道水位降落对边坡稳定的影响[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 389-393.
- Lu Y, Lu Y Jun, Zhang X N. Stability of river bank subject to drawdown of water level[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 389-393.
- [13] 俞伯汀, 孙红月, 尚岳全. 含碎石粘性土边坡渗流系统的物理模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 705-708.
- Yu B T, Sun H Y, Shang Y Q. Physical model simulation tests on seepage system in debris-containing clay slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 705-708.
- [14] 张文杰, 陈云敏, 凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1510-1516.
- Zhang W J, Chen Y M, Ling D S. Seepage and stability analysis of bank slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1510-1516.
- [15] 高小育, 廖红建, 丁春华. 渗流对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 69-72.
- Gao X Y, Liao H J, Ding C H. Seepage effects on soil slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 69-72.
- [16] 徐东强, 姜芳禄, 赵晓艳, 等. 渗流作用下边坡最危险圆弧滑面的优化解[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 214-217.
- Xu D Q, Jiang F L, Zhao X Y, et al. Accurate solution of most dangerous circle slip surface in seepage soil and rock mass[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 214-217.
- [17] 张永生, 梁立孚, 周健生. 水位骤降对土质渠道边坡稳定性影响的弹塑性有限元分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(6): 736-739.
- Zhang Y S, Liang L F, Zhou J S. Elastic-plastic finite element analysis of influence of sudden water level fall on stability of canal slope soil[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(6): 736-739.
- [18] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203-3210.
- Zheng Y R, Shi W M, Kong W X. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203-3210.
- [19] 仵彦卿. 岩土水力学[M]. 科学出版社, 北京: 2009.
- Wu Y Q. Geohydraulics[M]. Science Press, Beijing: 2009.

- [20] 廖红建, 盛谦, 高石秀, 等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3454-3458.
Liao H J, Sheng Q, Gao S H, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3454-3458.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on Compression-shear Failure Mechanism by Seepage-driving for the Quasi Earthy Bank Slope during the Drawdown in Three Gorges Reservoir

ZHOU Yuntao^{1,2}, TANG Hongmei³, CHEN Hongkai³

(1. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734;

2. Institute of Exploration Technology CAGS, Chengdu 611734;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For the problem of seepage failure and based on compression-shear acting on the quasi earthy bank slope by seepage-driving force during the drawdown in Three Gorges reservoir, compression-shear failure model by seepage-driving force was established in this paper, and the calculation method of seepage-driving force was improved, then compression-shear failure criteria by seepage-driving for the quasi earthy bank slope was imposed. Taking the example of Qingshi bank slope, the compression-shear failure mechanism by seepage-driving force was identical to the failure of Qingshi bank slope during the drawdown by verification. The effect on seepage-driving force and stability of bank slope by the falling velocity of the reservoir water level, time and the initial water level were discussed in this paper, which obtained that seepage-driving force increased nonlinearly with the growth of the falling velocity of the reservoir water level; seepage-driving force decreased linearly with the growth of the initial reservoir water level; stability coefficient of Qingshi bank slope decreased nonlinearly with the growth of the falling velocity but was invariable with the falling time of the reservoir water level.

Key words: rock and soil mechanism; seepage-driving force; compression-shear failure; the quasi earthy bank slope; Three Gorges reservoir

(责任编辑 许 甲)