

文章编号: 1008-2786-(2019)1-062-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000399

库岸边坡倾角及水位变化对红土型库岸 稳定性影响研究

张祖莲, 梁谏杰, 黄 英, 邱观贵, 袁 强

(昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500)

摘 要: 水库库岸失稳对水库安全运行有重大影响。采用土工试验和干湿循环试验, 结合数值计算及理论分析, 研究红土型库岸边坡倾角和库水位升降与库岸稳定性的关系。结果表明: (1) 在一定初始干密度条件下, 红土抗剪强度随水位升降循环次数增加而非线性减小, 且在水位升降循环约 10 次时趋于稳定。(2) 在一定水位升降速率、升降幅度和升降循环次数条件下, 红土型库岸稳定安全系数随库岸边坡倾角的增加总体上呈减小的趋势, 且在边坡倾角为 50° 左右存在稳定安全系数极小值。(3) 在一定水位升降循环次数条件下, 水位上升到坡高的 60% 左右为上升阶段的相对危险区域, 且水位上升速率对库岸稳定安全系数影响很小; 水位下降至坡高的 70% 左右为库水位下降阶段的相对危险区域, 且水位下降速率越大, 库岸稳定安全系数越小。(4) 针对一定初始干密度, 库岸稳定安全系数先随水位升降循环次数的增加而减小, 但在水位升降循环次数约 10 次后逐渐趋于稳定。库岸岩土体性质及库岸边坡倾角、水位变化都会对库岸稳定产生影响。

关键词: 红土; 抗剪强度; 库岸边坡倾角; 水位升降速率; 水位升降幅度

中图分类号: P642.2; X43

文献标志码: A

水库库岸失稳对水库安全运行带来重大影响。库岸失稳除具有一般坡地失稳的基本特征外, 还与库岸边坡倾角、库岸岩土体性质、水位升降、波浪淘刷、蓄水浸泡等因素密切相关。这些因素不仅改变了库岸边坡的力学机制, 还会因干湿循环造成库岸岩土体的损伤破坏。因此, 与一般坡地失稳相比, 库岸边坡失稳具有特殊性。

边坡高度和倾角是库岸形态的重要参数, 对库岸失稳有直接的影响。库岸边坡平缓, 则一般不易失稳; 水上库岸边坡高陡, 则失稳速度较慢, 但最终失稳范围大, 水上岸坡低缓时则反之; 水下陡直、岸前水深的库岸, 不易形成浅滩, 但会加速库岸失稳的过程, 且失稳范围广; 水下岸坡浅缓, 岸前有阶地和漫滩, 可减弱库岸失稳速度, 且失稳范围小^[1-2]。库

水位升降、波浪淘刷和库水浸泡, 一方面引起库岸岩土体内渗流状态发生变化, 从而改变库岸岩土体的内力分布; 另一方面由此引起的干湿循环又改变库岸岩土体的性质、强度、结构和状态, 使库岸岩土体性质不断劣化。这两方面的共同作用是导致库岸失稳的重要原因。针对库水位升降导致的库岸失稳, 大多认为库水位上升时库岸稳定性总体上呈逐渐增大的趋势, 而库水位下降时稳定性总体上呈逐渐减小的趋势, 且库水位骤降对库岸稳定性影响很大^[3-9]。随着科学技术的不断发展, 一些新的研究成果和方法被引入到库岸失稳研究中^[10-11], 这为深入研究水库蓄水及水位升降条件下库岸稳定提供了条件。研究表明: 库岸岩土体的物质组成、性质等, 直接影响到库岸失稳的宽度、速度和形式, 水库蓄水

收稿日期 (Received date): 2018-04-15; **改回日期** (Accepted date): 2018-12-24

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金地区基金项目 (51269006, 51568031)。[Region Program of National Natural Science Foundation of China (51269006, 51568031)]

作者简介 (Biography): 张祖莲 (1964-), 女, 副教授, 主要从事岩土工程及水工结构工程研究。[ZHANG Zulian (1964-), female, associate professor, research on geotechnical engineering and hydraulic structure engineering] E-mail: zhangzulian@2008.sina.com

和水位升降引起的水土作用会对库岸岩土体工程性质产生影响^[12,17]。事实上,相关研究成果都证明了库岸岩土体经水位反复升降引起的干湿循环作用后其内摩擦角和粘聚力均会下降,由此降低了库岸岩土体的抗剪强度^[13-15],从而对库岸稳定造成不利影响。

综上所述,库岸失稳取决于水对库岸岩土体的力学作用和物理化学作用。本文采用土工试验、数值计算和理论分析相结合的方法,研究库水位升降引起的云南红土型库岸干湿循环作用,分析库岸边坡倾角及库水位变化与库岸稳定的关系。

1 试验方法

通过干湿循环试验来模拟库水位升降造成的库岸土体干湿循环作用,通过土工试验研究红土抗剪强度随干湿循环次数的变化过程。

1.1 试验材料

以采集和制备好的云南红土作为试验材料,依据《土工试验规程》^[16],测试得出表 1 所示的云南红土基本特性^[17]。

表 1 试验红土特性^[17]
Tab. 1 Properties of test laterite^[17]

比重 G_s	最优 含水率 $\omega_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	颗粒质量分数/ $\%$		
			黏粒 <0.005 mm	粉粒 0.005 ~ 0.075 mm	砂粒 >0.075 mm
2.71	26.50	1.40	54.80	42.80	2.40

1.2 试验制样

试验拟定的红土试样初始干密度为 1.2、1.3、1.4 g/cm^3 ,初始含水率均为 26.5%。根据拟定试验工况配制一定含水率的试验土样,覆盖静置 24 h 左右,以使水分与红土充分融合。将配制好的土样装入环刀并分层击实,以达到试验所需的干密度。为便于各工况试验参数的比较,所需试验土样一次全部完成。

1.3 试验过程

拟定试样干湿循环次数分别为 1、2、3、4、5、6、8、10、12、15 次共 10 个工况,对土样进行反复干湿循环,测试对应干湿循环条件下红土抗剪强度,以模

拟水库水位升降对库岸土体抗剪强度的影响。对于实际红土型库岸,当水库蓄水及水位上升时,水分渗入库岸土体,可对应于干湿循环试验的浸泡增湿过程;当水库水位下降时,水分从库岸土体中渗出或蒸发,可对应于干湿循环试验的脱湿风干过程,也即水库水位的反复升降导致库岸土体反复浸泡增湿或脱水风干,使得库岸岩土体不断经历干湿循环作用,且通过反复的浸泡增湿-脱水风干的干湿循环试验进行模拟。浸泡增湿前称土样质量,然后对土样浸泡约 24 h 增湿。将浸泡增湿后的土样脱湿风干。当脱湿风干过程中土样质量与干湿循环试验前的土样质量差在 0.1% 范围内时,认为土样完成了一次浸泡增湿-脱湿风干的干湿循环。将完成一次浸泡增湿-脱湿风干的土样进行直剪试验,根据直剪试验数据通过莫尔圆包线计算土样的粘聚力、内摩擦角和抗剪强度。

2 结果与分析

水库在运行过程中不可避免的蓄水和水位升降,一方面改变了库岸的力学机制,另一方面水分在库岸岩土体中的侵入和蒸发,改变了库岸岩土体的水文地质条件,从而改变了库岸土体的颗粒形态、颗粒排列、孔隙形态和颗粒间接触关系等微结构特征,进而引起土体宏观力学性质的相应变化,这两方面的共同作用都将改变库岸稳定性。反映库水位升降的参数包括水位升降速率、升降幅度以及升降循环次数,这些参数都会影响到库岸稳定性。表征库岸形态的重要参数包括库岸边坡高度和倾角,这两个参数不同,库岸稳定性也将发生相应变化。

云南红土属粘性土,其抗剪强度由粘聚力和摩擦力构成,而粘聚力的存在导致粘性土边坡的危险滑动面必定深入土体内部。库岸失稳具有一般坡地失稳的基本特征,因此本文采用粘性土边坡稳定分析的基本原理,运用 GeoStudio 数值仿真软件建立模型,不考虑降雨、地震等其他条件。针对库水位上升、蓄水、下降三种工况,运用 SLOPE/W 模块模拟库岸土体渗流场,将库岸当成变形体,按照土的变形特性,通过对库岸土体进行单元划分后,采用有限元法计算库岸土体的应力分布,引入圆弧滑动面的概念,针对被单元体划分为若干小弧段的滑动面,求出所有小弧段的剪应力和抗剪强度,累加求出沿滑动

面的总剪切力和抗剪强度,然后计算库岸稳定安全系数。库岸有限元分析模型如图1所示。图1的边界条件为:库岸边坡迎水面水平方向与垂直方向均自由,库岸背水面定义为无限边界,水平方向与垂直方向均不受约束。计算过程中红土的物理力学参数均由土工试验获得。库岸边坡迎水面为变水头边界,采用介质运移方法来模拟库水位的升降变化过程^[17]。

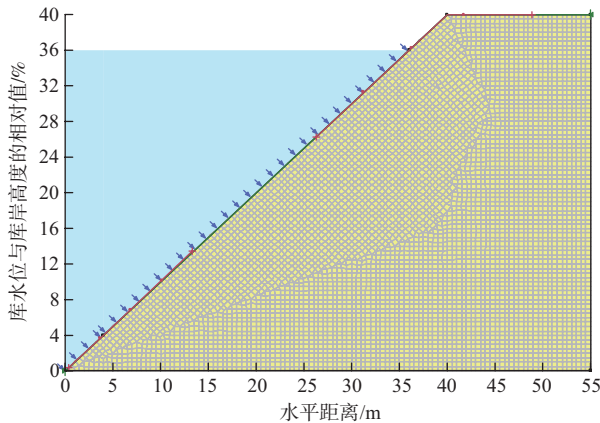


图1 库岸有限元分析模型^[17]

Fig. 1 Model of finite element analysis of reservoir bank^[17]

2.1 红土抗剪强度随干湿循环次数的变化

土体抗剪强度是影响库岸稳定的重要因素。水库蓄水及水位升降引起的干湿循环造成了库岸土体结构的变化,进而引起库岸土体抗剪强度的变化。

结合干湿循环试验和土工试验,针对一定初始干密度的红土试样,得出图2所示的试验土样抗剪强度与干湿循环之间的对应关系,二者之间的关系表明:当初始干密度一定时,红土抗剪强度随干湿循环次数的增加而减小。当干湿循环小于6次时,红

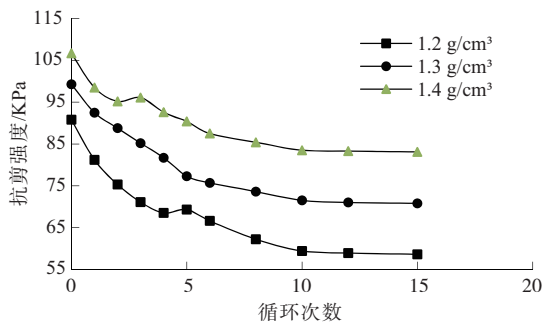


图2 土样抗剪强度与水位升降循环的关系

Fig. 2 Relationship between the shear strengths of soil samples and the water level fluctuations

土抗剪强度下降较快;当干湿循环在6~10次时,红土抗剪强度持续下降但降幅变小;当干湿循环约10次后,红土抗剪强度变化趋于稳定。在一定干湿循环次数条件下,红土试样的初始干密度越大,其抗剪强度越高。其原因在于:干湿循环的浸泡增湿,使红土吸水膨胀;而风干脱水又使得其体积收缩,再加上浸泡增湿过程和风干脱水过程中红土胶结结构的变化,导致土样裂隙的发生、发展,裂缝的存在为水分的渗入提供了通道。水分的渗入既改变了土样含水率,又破坏了土颗粒间结构键力,导致红土结构的损伤破坏,从而削弱了红土抗剪强度。红土抗剪强度之所以随干湿循环的增加而减小,其根本原因在于干湿循环对土体微结构的改变。干湿循环使得土体颗粒形态、排列发生变化,颗粒间距和孔隙比也随之增大,因而红土粘聚力、内摩擦角减小,红土抗剪强度也被削弱。干湿循环作用对土体的损伤破坏不是无限的,在一定干湿循环作用后,红土的吸水膨胀和脱水收缩程度均大幅下降,红土结构逐渐达到新的平衡并趋于稳定,这也使得红土在经历多次干湿循环过程后,其抗剪强度最终趋于一个稳定值。

2.2 红土型库岸稳定性随库岸边坡倾角的变化

水库库岸稳定性与库岸形态特征参数密切相关,而库岸边坡倾角就是表征库岸特征的重要参数之一,因此库岸边坡倾角对其稳定性有重要影响。为突出库岸边坡倾角对其稳定性的影响,针对不同干湿循环次数条件下的红土抗剪强度,且在库水升降速率和升降幅度一定的条件下,分别研究25°~70°范围内不同库岸边坡倾角的库岸稳定安全系数,以研究红土型库岸稳定安全系数与库岸边坡倾角的关系,其结果如图3所示。

图3表明:在一定库水升降速率、升降幅度和升降次数条件下,当库岸边坡倾角增加时,在干湿循环4次范围内,红土型库岸稳定安全系数逐渐减小;在干湿循环次数约5次后,稳定安全系数呈先较快下降后略有增加,然后再次下降的变化过程,且在库岸边坡倾角为45°~50°区间时,安全系数降幅最大,在边坡倾角为50°左右存在安全系数的极小值。以库岸土体未开始干湿循环的初始状态为例,当库岸边坡倾角从45°增加到50°时,库岸稳定安全系数从1.728降到1.644,降幅达4.86%。在库水升降循环过程中,库岸边坡倾角在50°左右安全系数降幅最大,由循环0次的1.644下降到升降循环15次时

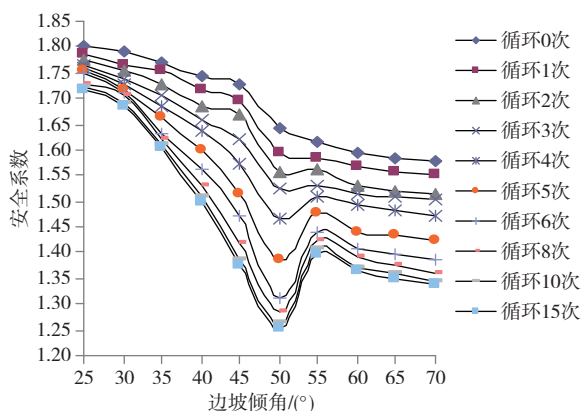


图3 库岸边坡倾角与库岸稳定安全系数的关系

Fig. 3 Relationship between the bank slope angles and the safety factor of reservoir bank

的1.255,下降幅度达23.66%,也即,红土型库岸最易失稳的倾角范围为 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$,此时库岸稳定安全系数降幅最大,因此在实际工程中应尽量避免库岸边坡倾角处于危险区间范围内。库岸边坡稳定安全系数之所以总体上随边坡倾角的增加而减小,是因为边坡倾角的改变引起了库岸边坡抗滑力和滑动力的变化,也改变了库岸边坡的力学机制,即改变了库岸边坡的抗滑力和滑动力,且库岸边坡倾角越大,库岸边坡的滑动力也相对越大,而抗滑力则相对减小,导致库岸边坡稳定性下降,库岸稳定安全系数也随之减小。

2.3 红土型库岸稳定性随库水位升降的变化

在水库运行过程中,水库水位升降将改变库岸稳定性,特别是在水库水位骤降时,库岸失稳的可能性增加,而反映水库水位升降的因素主要包括水位升降幅度、水位升降速率和水位升降循环次数。

2.3.1 红土型库岸稳定性随库水位升降幅度的变化

为研究水库水位升降幅度对库岸边坡稳定性的影响,在库岸土体粘聚力、内摩擦角、抗剪强度、库岸边坡倾角及库水位升降速率及升降次数一定的条件下,引入库水位升降幅度的相对值(库水位升降的绝对值与水库库岸坡高之比),研究库水位升降幅度对库岸稳定性的影响。其结果如图4和5所示。

图4为库水位上升过程中库岸稳定安全系数与水位上升幅度的关系。图4表明:库岸稳定安全系数随库水位上升的变化与库水位上升幅度的相对值有关。在库水位上升至坡高的10%~60%区间时,库岸稳定安全系数随库水位上升幅度的增加而减

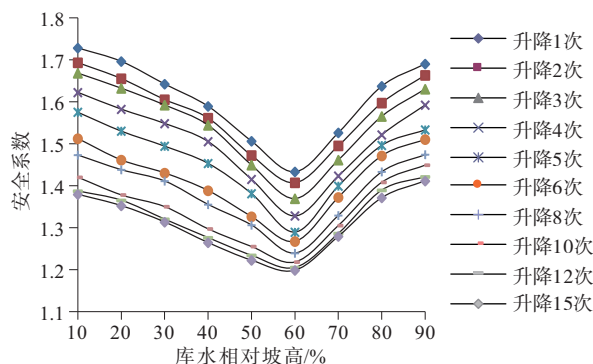


图4 库水上升阶段库岸稳定安全系数与水位变幅的关系

Fig. 4 Relationship between the safety factor of reservoir bank and the amplitude of water level variation in a water level rising phase

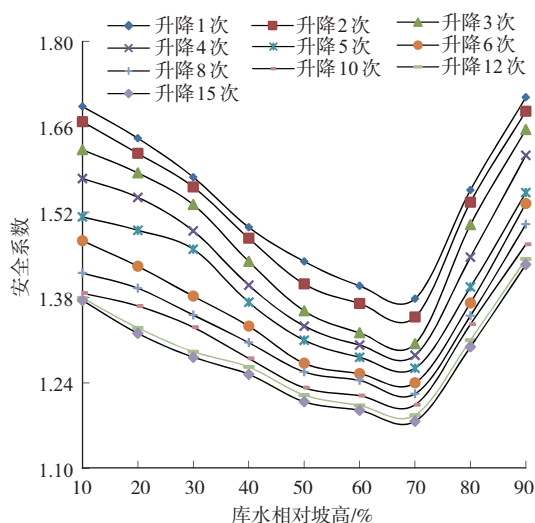


图5 库水下降阶段库岸稳定安全系数与水位变幅的关系

Fig. 5 Relationship between the safety factor of reservoir bank and the amplitude of water level variation in a water level falling phase

小,并在上升到坡高的60%时降至最低点;此后,库岸稳定安全系数随水位上升幅度的增加而增加。因此,库水位上升到坡高的60%左右为库水位上升阶段的相对危险区域。

图5为库水位下降过程中库岸稳定安全系数随水位下降幅度的变化。由图5可以得出:当库水位从相对坡高的90%下降至相对坡高的70%时,库岸稳定安全系数呈现下降趋势并在坡高70%左右降至最低点;当库水位下降至坡高的70%~10%区间内时,库岸稳定安全系数又呈现逐渐上升趋势,表明库水位下降至坡高的70%左右为库水位下降阶段相对危险区域。

以库水位升降一次为例,比较库水位上升和下降过程中库岸稳定安全系数的变化幅度。在库水位

上升阶段,当库水位上升到坡高的 10%,库岸稳定安全系数为 1.728,当库水位上升到 60% 的危险相对坡高时,库岸稳定安全系数为 1.433,下降幅度为 17.1%。在库水位下降阶段,当库水位下降至坡高的 90% 时,其稳定安全系数为 1.708,当库水位下降到 70% 的危险相对坡高时,其稳定安全系数为 1.378,下降幅度为 19.3%,因此,相比之下,库水位下降时,库岸更易失稳。

2.3.2 红土型库岸稳定性随库水位升降速率的变化

针对一定干湿循环次数下的库岸红土抗剪强度和一定的库岸边坡倾角、库水升降幅度,在库水位升降速率分别为 0.15、0.2、0.35、0.4、0.55 m/d 的条件下,研究不同库水位升降速率对库岸稳定性的影响,其结果如图 6 和 7 所示。

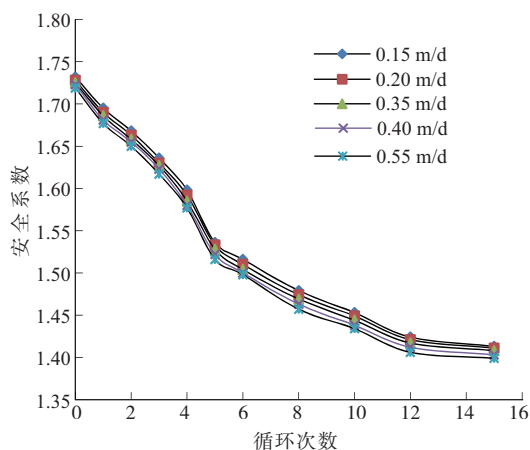


图 6 库水位上升速率与库岸稳定安全系数的关系

Fig. 6 Relationship between the water level rising rate and the safety factor of reservoir bank

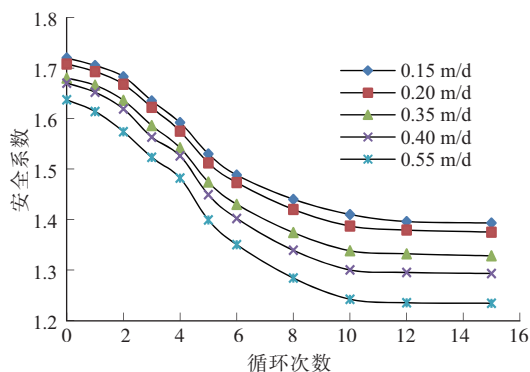


图 7 库水位下降速率与库岸稳定安全系数的关系

Fig. 7 Relationship between the water level falling rate and the safety factor of reservoir bank

由图 6 可以得出:在库水位上升阶段,库水上升速率对红土型库岸稳定性影响程度很小,不同库水

位上升速率对应的库岸稳定安全系数在数值上比较集中,也即在库水位上升阶段,水位上升速率对库岸稳定安全系数影响很小,在实际工程中这个影响可以忽略。由图 7 可以得出:针对库水位下降阶段,在一定水位升降循环次数条件下,库水位下降速率越大,库岸稳定安全系数越小;在一定库水位下降速率条件下,库岸稳定安全系数随水位升降循环次数的增加而减小。以库水位下降速率为 0.15 m/d 为例,库岸稳定安全系数由初始时的 1.720 下降至库水升降 15 次后的 1.393,降幅为 19.01%。当库水下降速率分别为 0.2、0.35、0.4、0.55 m/d 时,库岸稳定安全系数均有不同程度的下降,可见库水位下降速率与库岸稳定安全系数呈反相关关系,这与文献[6]的结论是一致的。因为库水下降速率越快,作用于库岸红土颗粒上的动水压力也相对越大,就越不利于库岸稳定。

2.3.3 红土型库岸稳定性随库水位升降循环次数的变化

水库水位的反复升降,必然引起库岸土体的干湿循环,从而造成库岸土体结构的损伤破坏,这将显著影响红土型库岸稳定性。结合干湿循环作用下红土抗剪强度的变化,研究水位升降循环次数引起的干湿循环作用对红土型库岸稳定的影响。

在一定库岸边坡倾角和库水位升降速率条件下,图 8 反映了红土型库岸稳定安全系数与水位升降循环次数之间的关系。

就图 8 而言:针对一定初始干密度,当水位升降循环在小于 6 次的范围内增加时,红土型库岸稳定安全系数随之减小,且减小幅度较大;当水位升降循环在 6~10 次范围增加时,库岸稳定安全系数持续

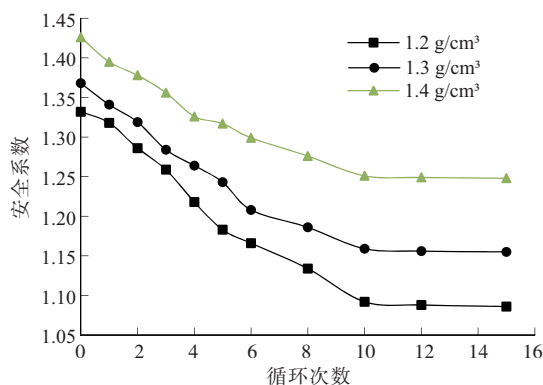


图 8 库岸稳定安全系数与水位升降循环的关系

Fig. 8 Relationship between the safety factor of reservoir bank and the water level fluctuations

减小,但减小幅度变小;当水位升降循环约10次后,随水位升降循环的增加,库岸稳定安全系数变化很小,也即库岸稳定性趋于新的平衡状态,因此,可将第10次水位升降循环后的云南红土型库岸稳定安全系数作为设计施工的依据^[17]。

红土型库岸稳定安全系数、红土抗剪强度与水位升降循环次数之间的对应变化趋势较为一致,这也表明了土体抗剪强度对库岸稳定性有显著影响,而抗剪强度大小又决定于土体粘聚力和内摩擦角,水位升降循环次数的增多导致了红土粘聚力和内摩擦角的衰减,从而导致红土抗剪强度减小,进而引起红土型库岸稳定安全系数降低。

3 结论

本文采用土工试验、数值计算和理论分析相结合的方法,研究云南红土型库岸边坡倾角、水位升降幅度及速率对库岸稳定性的影响,得出如下结论:

1) 针对一定初始干密度,当水位升降循环在小于6次范围内增加时,红土抗剪强度衰减幅度较大;当水位升降循环在6~10次范围内增加时,红土抗剪强度衰减幅度减小;当水位升降约10次后,红土抗剪强度趋于稳定状态。

2) 在一定库水位升降速率、升降幅度和升降循环次数条件下,虽然当干湿循环次数超过5次时,红土型库岸稳定安全系数随库岸边坡倾角的增加略有起伏,但总体上呈减小的变化趋势,且在库岸边坡角为 45° ~ 50° 区间时,库岸稳定安全系数降幅最大。

3) 当库水位升降循环一定时,在库水位上升阶段,库岸稳定安全系数随库水位上升幅度的增加呈先减小而后增大的变化趋势,且在上升到坡高的60%时,库岸稳定安全系数降至最低点。在库水位下降阶段,当水位从高水位下降至低水位时,库岸稳定安全系数随库水位下降幅度的增加呈先减小而后增大的变化趋势,且在库水位为坡高的70%左右降至最低点。

4) 针对初始干密度一定的红土型库岸,在库水位上升阶段,水位上升速率对库岸稳定安全系数影响相对很小,且在库水位上升速率一定时,库岸稳定安全系数随水位升降循环次数的增加而较小。在库水位下降阶段,库水位升降速率对库岸稳定安全系数的影响相对明显,且当库水位升降循环次数一定

时,库水位下降速率越大,库岸稳定安全系数越小;在库水位下降速率一定时,库岸稳定安全系数随库水位升降循环次数的增加而减小。

5) 针对一定初始干密度,当库水位升降循环在6次范围内增加时,库岸稳定安全系数下降幅度较大;当库水位升降循环在6~10次范围内增加时,库岸稳定安全系数下降幅度变小;当库水位升降约10次后,库岸稳定安全系数趋于稳定。

影响库岸稳定的因素很多,各因素之间相互影响、相互制约和促进。本文仅考虑了干湿循环作用、库岸边坡倾角和库水位升降对库岸稳定性的影响,没有考虑诸如降雨、地震、人类活动等作用。此外,在设计使用期内,水库库岸经历干湿循环周期很长,但本文研究的水位升降循环次数有限。因此长期干湿循环和复杂因素条件下的库岸稳定性还有待于结合工程实际和新理论、新方法进行更加深入的研究。

参考文献(References)

- [1] 王浩,夏立权. 涉水库岸稳定性影响因素及敏感性分析[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(6): 296-300. [WANG Hao, XIA Liquan. Influence factors and sensitivity analysis of stability for bank involved in water[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2009, 23(6): 296-300]
- [2] 冉冉,刘艳锋. 利用BSTEM模型分析库岸边坡形态对其稳定性的影响[J]. 地下水, 2011, 33(2): 162-165. [RAN Ran, LIU Yanfeng. Analysis of the impact of reservoir bank geometry on the stability via BSTEM model[J]. Ground Water, 2011, 33(2): 162-165]
- [3] 莫伟伟,徐平,丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 997-1002. [MO Weiwei, XU Ping, DING Xiuli. Research advances on the influences of reservoir water level fluctuation on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 997-1002]
- [4] 宋丹青,王丰,梅明星,等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 60-64. [SONG Danqing, WANG Feng, MEI Mingxing, et al. Study on influence of water impounding on reservoir landslide[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(1): 60-64]
- [5] 陈晓平. 基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 77-83. [CHEN Xiaoping. Overview of landslides due to reservoir impoundment based on shear strength properties of sliding zone soil[J]. Advances in Science and Technology of water Resources, 2010, 30(3): 77-83]
- [6] 王小敏. 库水位骤降情况下均质库岸边坡稳定性分析[J]. 贵州

- 大学学报(自然科学版), 2012, **29**(1): 110 – 113. [WANG Xiaomin. Stability analysis of homogeneous reservoir bank under drawdown condition [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2012, **29**(1): 110 – 113]
- [7] 贾逸, 任光明. 某库岸滑坡在水库运行条件下稳定性的动态变化 [J]. 水利与建筑工程学报, 2011, **9**(5): 24 – 30. [JIA Yi, REN Guangming. Dynamic changes of stability of a certain reservoir land slide under conditions of reservoir water level fluctuation [J]. Journal of Water Resources and Architectural, 2011, **9**(5): 24 – 30]
- [8] 时卫民, 郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析 [J]. 水利学报, 2004, (3): 76 – 80. [SHI Weiming, ZHENG Yingren. Analysis on stability of landslide during reservoir drawdown [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (3): 76 – 80]
- [9] 曾刚. 库水升降作用下水库库岸滑坡稳定性分析 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, **33**(4): 15 – 18. [ZENG Gang. Stability analysis of landslide under reservoir water level fluctuation [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2011, **33**(4): 15 – 18]
- [10] 罗轶, 任光明, 王志红, 等. 某水库库岸稳定性的模糊综合评判 [J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(6): 67 – 70. [LUO Yi, REN Guangming, WANG Zhihong, et al. Fuzzy Comprehensive evaluation on the stability of reservoir bank [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(6): 67 – 70]
- [11] 徐佩华, 陈剑平, 阙金声, 等. 基于人工神经网络的三峡水库库岸稳定性分级 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(3): 564 – 569. [XUE Peihua, CHEN Jianping, QUE Jinsheng, et al. The grading model of reservoir bank stability of Three Gorges based on artificial neural network method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, **37**(3): 564 – 569]
- [12] 毕仁能, 项伟, 郭义, 等. 库岸滑坡黏性土与河水物理化学作用试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(7): 28 – 31. [BI Renneng, XIANG Wei, GUO Yi, et al. Physical and chemical reaction between river water and clayey soil from reservoir landslide [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, **28**(7): 28 – 31]
- [13] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红粘土抗剪强度的水敏性研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(1): 17 – 22. [WANG Zhongwen, HONG Baoning, LIU Xin, et al. Ater-sensitive properties of shear strength of red clay [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, **43**(1): 17 – 22]
- [14] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水 – 岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1298 – 1302. [LIU Xinrong, FU Yan, WANG Yongxin, et al. Deterioration rulers of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1298 – 1302]
- [15] 周世良, 刘小强, 尚明芳, 等. 基于水 – 岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2012, **33**(7): 1933 – 1939. [ZHOU Shiliang, LIU Xiaoqiang, SHANG Mingfang, et al. Time-varying stability analysis of mudstone reservoir bank based on water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(7): 1933 – 1939]
- [16] 南京水利科学研究所. 土工试验规程: SL237 – 1999 [S]. 沈阳: 辽宁民族出版社, 1999: 19 – 49. [Nanjing Academy of Water Conservancy. Specification of soil test: SL237 – 1999 [S]. Shenyang: Liaoning rationalities press, 1999: 19 – 49]
- [17] 张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 等. 干湿循环作用下云南红土特性与库岸边坡稳定性关系研究 [J]. 山地学报, 2018, **36**(2): 280 – 288. [ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, et al. On the relationship between characteristics of Yunnan laterite and stability of the bank slope under wetting-drying cycles [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2): 280 – 288]

Investigation of the Influence of Slope Inclination and Water Level Fluctuation on the Stability of Laterite Reservoir Bank

ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, QIU Guangui, YUAN Qiang

(College of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Reservoir bank instability poses great threat to the operation of reservoir. It is recognized that reservoir bank stability would be influenced by rock and soil properties, the inclination of bank slope and water level fluctuations. In this research, it investigated the relationships between slope angles, fluctuation of water level and the stability of a reservoir bank by joint works, including soil property tests, geotechnical experiments of dry and

wet cycle for bank stability, numerical modelling and theoretical analysis. Results concluded: (1) under a certain initial dry density condition, the shear strength of laterite decreased nonlinearly with the increase of the number of water level fluctuation, and it tended to be stable when the number of fluctuation was about 10. (2) With a certain water level lifting rate, a certain lifting amplitude and a certain number of fluctuation times, the reservoir bank safety coefficient tended to decrease when the bank slope angle increased and the minimum of the bank safety coefficient existed when the slope angle was about 50° . (3) under a condition of a certain number of fluctuation times, the water level lifting rate did not affect the safety coefficient much, but the reservoir bank would be in risk when the water level raised up to about 60% of the bank slope height; however, during the water level drop, the bank safety coefficient decreased when the water level falling rate increased and the reservoir bank would be in risk when the water level reached about 70% of the bank slope height. (4) For a certain initial dry density, the safety coefficient of the reservoir bank firstly decreased with the increase of the number of water level fluctuation times, and gradually became stable after water level fluctuates 10 times.

Key words: laterite; shear strength; bank slope angle; rate of water level variation; amplitude of water level variation