

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0079

黎良辉,罗星,赵旭,等.降雨条件下临水岸坡失稳试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):758-767. LI L H, LUO X, ZHAO X, et al. Experiment on water bank instability under rainfall[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 758-767. (in Chinese)

降雨条件下临水岸坡失稳试验

黎良辉¹, 罗星¹, 赵旭¹, 雷声², 徐富刚^{1,2}

(1. 南昌大学建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029)

摘要:为探究降雨条件下边坡坡度与坡体材料对临水岸坡失稳的影响,考虑不同边坡坡度和坡体材料 2 个变量,开展 5 组降雨条件下临水岸坡失稳模型试验,观察不同时刻岸坡变形特点并采用孔隙水压力计和土压力计监测坡体不同位置的孔隙水压力和土压力变化。试验结果表明:降雨对坡体表层结构稳定性影响显著,表层结构在降雨作用下迅速饱和,抗剪强度大幅降低,稳定性劣化,而内部结构因为水体较难渗入,影响较小;边坡坡度对边坡稳定影响较大,坡度越大降雨下渗越深入,下滑力增大,向下渗透力更强,对边坡稳定不利,即影响性坡度 $60^{\circ} > 45^{\circ} > 30^{\circ}$;坡体材料直接影响边坡稳定,不同材料的坡体渗透性能不同,当坡体含砂率为 40% 时渗透性能最好,坡体在 5 min 产生破坏且孔隙水压力响应较快,其发生失稳的概率更高;而坡体为纯黏土时渗透性最差,未产生明显破坏且坡内孔隙水压力响应较慢,降雨对边坡稳定性的影响有限。

关键词:临水岸坡;降雨入渗;模型试验;坡度;坡体材料

中图分类号:TV83 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



降雨入渗是岸坡失稳的重要诱因,大量边坡失稳发生在降雨期间及降雨后的一定时间内^[1-2]。1978 年 8 月,湖北秭归县发生强降雨,引起了长江沿岸多处滑坡^[3];1982 年 7 月,重庆云阳县因降雨发生 2 万多处滑坡,数万间房屋倒塌破坏^[4];2016 年 6 月,陕西延安持续强降雨导致大量山体滑坡,落石把道路损毁,造成较大的人员财产损失^[5]。因此,了解降雨条件下岸坡失稳机理并在此基础上提出有效的防治措施极为必要。

目前,国内外学者^[6-7]对降雨条件下岸坡失稳开展了大量的研究并取得了一定的研究成果。陈剑等^[8]和 Finlay 等^[9]采用统计分析研究降雨诱发滑坡的规律;吴宏伟等^[10]和 Sony 等^[11]利用有限元方法广泛开展了针对降雨边坡的水土特性和变形破坏的研究,得到了非饱和土坡在降雨作用下的应力与变形规律;姚海林等^[12]通过研究降雨入渗对非饱和

膨胀土边坡稳定性的影响,指出降雨强度对膨胀土边坡的影响程度与土体本身的渗透性密切相关;Ram 等^[13]针对砂土边坡的研究结果表明降雨强度与滑动起始时间、初始滑移面位置之间存在一定的关系;苏永华等^[14]在 GA 模型基础上建立适用于边坡并且能综合考虑湿润层土体含水率分布情况及饱和层内平行于坡面渗流作用的降雨入渗分析模型——LSGA 模型,并将 LSGA 模型应用到边坡稳定性分析;张华庆等^[15]基于有限元强度折减法,采用 Abaqus 软件建立三维软土岸坡有限元模型,分析了降雨强度、时间以及饱和渗透系数对岸坡稳定的影响;Won 等^[16]通过对压实土边坡的研究,得出降雨入渗是引起边坡非饱和区浅层破坏的主要原因。这些研究对于了解降雨条件下边坡失稳机理具有积极意义,然而边坡坡度与坡体材料直接决定边坡的稳定程度,目前该类研究

收稿日期:2020-07-21 修回日期:2020-11-09 网络出版时间:2020-11-17

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201117.0849.004.html

基金项目:江西水利厅重点资助项目;中国博士后基金;江西省自然科学基金(20192BAB216040;20202BAB204034)

作者简介:黎良辉(1973—),男,江西崇义人,副教授,主要从事水工结构研究。E-mail:413022219@qq.com

通信作者:徐富刚(1988—),男,江西高安人,讲师,博士,主要从事水利工程及管理研究,E-mail:785315056@qq.com

较少,尤其是模型试验方面的研究。因此,开展降雨条件下边坡坡度与坡体材料对岸坡稳定性的影响极为必要。

本文考虑不同边坡坡度和坡体材料 2 个变量,开展 5 组降雨条件下临水岸坡失稳模型试验,观察不同边坡坡度和坡体材料坡体的破坏过程并分析其中土压力与孔隙水压力的变化规律,以期揭示边坡坡度和坡体材料在边坡失稳中的作用,为边坡失稳灾害防治提供参考。

1 依托工程概况

永安大堤位于江西省九江市柴桑区永安乡徐家湾——赛城湖闸,是九江市西翼的一个重要屏障。该区域地表黏性土厚度一般都小于 10 m,最薄处仅 2.8 m(徐家湾处),低强度、高、中压缩性,含水、饱水、透水性能差,呈可塑状。本区气候温和、湿润,雨量充沛。年平均降雨量 1 312.7~1 527.0 mm,雨日 140 d 左右,年最大降雨量 2 165.7 mm(1954 年),年最小降雨量 868.0 mm(1978 年)。

1998 年 2 月 12 日,九江长江大堤永安段高家湾、高六房、江边电站等 3 处发生连续崩岸,至 2 月 17 日崩岸长度达 222 m^[17]。其中:高家湾崩岸长 70 m,最大崩幅 25 m;高六房崩岸长 80 m,最大崩幅 29 m;

江边电站崩岸长 72 m,最大崩幅 30 m。2020 年 7 月,江西大洪水期间永安段也多次发生崩岸险情。该河段崩岸长度较长且多发生于汛期,汛期过后水位下降崩岸整体逐渐完整显露。造成崩岸的主要原因除了降雨量增多与工程人为因素外,岸坡坡度和地质条件也是重要诱因。试验结合永安大堤崩岸实况,通过现场采样,开展室内模型试验,分析二者在临水岸坡失稳过程中的影响。

2 试验设计

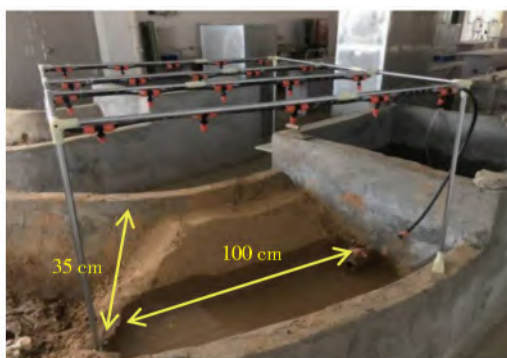
本试验在试验室水槽进行,降雨系统由可伸缩的支架和雾化喷头组成,通过雨量计对各位置进行测量并逐一调节保证降雨均匀;传感器包括土压力计和孔隙水压力计,试验前进行传感器的误差测试;每次试验后对试验水槽进行清理、晾干,以便下一次试验坡体的堆筑。试验具体过程如下。

2.1 试验装置

试验在深 40 cm、宽 100 cm 的“U”形混凝土水槽中进行(图 1(a)),表层水泥砂浆抹面作为较粗糙的底部边界,模拟天然坡体的基岩层。水槽上连水箱,底部设有带开关的出水口,用于调节试验的上游来水。墙面画有刻度和角度线以便于崩岸边坡模型搭建以及对照试验过程中坡体变形情况。



(a) 试验水槽



(b) 降雨装置

图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 试验材料

岸坡材料的物理力学性质是影响岸坡稳定的重要因素^[18-19]。试验材料取自长江九江永安堤段,材料主要为黏土,经力学测试,黏聚力和内摩擦角分别为 12.3 kPa 和 12.9°,天然密度为 1.84 g/cm³。为分析不同坡体材料对临水岸坡稳定性影响,通过人工配料方式,掺入部分细砂混合进行试验(根据现场调研发现部分河段坡体含砂率较高),试验中掺拌的粉砂来自相邻砂质河段现场取样,通过烘干碾碎,然后进行拌和。其中,20%含砂率材料黏聚力和内摩

擦角分别为 10.4 kPa 和 27.3°,40%含砂率材料黏聚力和内摩擦角分别为 8.1 kPa 和 31°。因此,试验过程中共考虑了不同含砂率的 3 种材料。

2.3 试验过程

(1)岸坡堆筑。岸坡模型为高度 35 cm,长度 100 cm,上窄下宽的梯形坡体,岸坡一面靠墙,另一面用砖头和土堆筑了高约 10 cm 的堤防(抬高河道水位,模拟临水岸坡)。为保证每次堆筑的模型压实度基本一致,以坡体密度作为控制指标,在相同质量的情况下,保持每次试验坡体体积相同,通过压实控

制坡体密度为 1.84 g/cm^3 , 试验土体均于长江永安段实地取样。

(2)人工降雨系统图 1(b)。人工降雨系统由支架和雾化喷头组成,模拟降雨前通过控制水管流量控制降雨量大小,喷头共 20 个,采用 5×4 形式布置以保证雨量分布均匀,降雨强度控制为 80 mm/h 。降雨过程中,在坡体前放置雨量杯来监测试验的降雨强度。

(3)测点布置。通过前期试探性试验,发现由于坡体渗透性较小,降雨对坡体内部影响较小,因此试验过程中把传感器布设在坡体浅表层。试验共布置 2 组测点,每组包含 1 个土压力计和 1 个孔隙水压力计。1 号监测点布置在坡体距坡底 12 cm 处;2 号监测点布置在坡体距坡底 30 cm 处。传感

器均埋设于坡体表面约 5 cm 且同一组测点传感器相距 10 cm 。

(4)降雨前静置。试验土体初始含水率较低,因此为更好地模拟临水岸坡土体状态,降雨开始前缓慢放水至坡前水位达到 10 cm 停止供水,静置 2 h 使水充分浸润土体,坡体内水压力达到平衡状态。

(5)模拟降雨。开始模拟降雨,保持相同降雨强度持续 2 h ,观察降雨过程中土压力、孔隙水压力及岸坡变形破坏过程和物理现象并记录。试验中利用 DV 摄影机记录整个试验过程。

2.4 试验工况

为探究强降雨条件下边坡坡度和坡体材料对临水岸坡失稳的影响,试验共设置 5 组模型试验,具体工况见表 1。

表 1 试验模拟工况

Tab. 1 Experimental simulation schemes

试验工况	坡度/ $^\circ$	坡体材料含砂率/ $\%$	监测类型	试验类别	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	水深/ cm	备注
1	30	0	孔隙水压力、土压力	对照组			
2	45	0	孔隙水压力、土压力	基本组			各压力图中压力采用“工况-监测点”表示
3	60	0	孔隙水压力、土压力	对照组	80	10	
4	45	20	孔隙水压力、土压力	对照组			
5	45	40	孔隙水压力、土压力	对照组			

为分析边坡坡度对强降雨条件下岸坡稳定的影响,工况 1、2、3 组均采用黏土坡体,对应坡度分别为 30° 、 45° 和 60° ,降雨强度控制为 80 mm/h ,坡前水深保持 10 cm 。为分析坡体材料对强降雨条件下岸坡稳定的影响,工况 2、4、5 组采用 45° 坡体,设置 3 种不同含砂率配比情况,分别为黏土(含砂率 0)、含砂率 20% 以及含砂率 40% ,降雨强度控制为 80 mm/h ,坡前水深保持 10 cm (表 1)。

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

降雨入渗是边坡失稳的重要诱因。在降雨入渗条件下雨水一方面对边坡土体起到了加载作用,即雨水使土体的含水量增大,重度变大,从而使滑移面的剪应力增大;另一方面雨水入渗改变边坡土体的力学性能,导致其黏聚力下降,基质吸力减小,抗剪强度降低^[20]。边坡土体的自重增加和强度降低这 2 个不利因素在雨水入渗过程中同时影响边坡的稳定性,达到一定程度就会引发边坡失稳。

3.1.1 不同坡度坡体变化特征

在降雨开始前,临水处坡体经过 2 h 浸泡基本达到渗透稳定。降雨初期坡体表面干燥,雨水一部

分渗入土体,另一部分在坡面汇聚,在重力作用下淘蚀坡面使坡表松散颗粒移动;随后土体趋于饱和,降雨强度大于土体入渗,开始形成坡面径流。由于土颗粒间润滑作用增强和胶结物质被溶解,坡面产生冲刷沟。通过对比分析试验 1、2、3 不同时刻的破坏过程发现 60° 坡度(试验 3)破坏最显著,坡表出现了大量的裂缝及冲沟,见图 2。

图 2 为 60° 坡体不同时刻的岸坡失稳情况。试验开始前坡体静置 2 h 后,在水土结合部位由于毛细水压的作用,在水面线以上约 5 cm 存在一定的润湿现象,且出现细微的裂缝,后保持相对稳定。降雨开始后坡体临水处很快产生了细微的横向裂隙(图 2(a));降雨 10 min 时,坡体表面部分松散土体在雨水冲刷作用下下滑,横向裂隙逐渐扩大明显(图 2(b));降雨 20 min 后,雨水在坡体表面形成径流,裂隙逐渐发展(图 2(c)); 30 min 时,随着坡体产生小规模崩塌并继续延展形成多条小裂缝,坡体进一步破坏(图 2(d));降雨 40 min 后,坡体崩塌范围扩大且崩塌处周围产生多条裂缝(图 2(e));试验结束后(降雨 2 h),坡体变形破坏基本稳定,坡度明显变缓,坡度由试验前的 60° 变为 47° ,坡体整体下滑了约 2 cm ,且坡面产生多处明显裂缝(图 2(f))。

在不同坡度情况下,临水岸坡响应有较大区别。

60°坡体在开始降雨 10 min 时产生了较明显的裂隙破坏并且裂隙不断增大,而 30°和 45°坡体在整个试验过程中坡体没有发生较大破坏。降雨 30 min 时,因黏性土渗透性较小,边坡渗透基本达到稳定,直至

试验结束。试验过程中各组坡体整体保持稳定,但均有不同程度的整体下滑且原坡度越大下滑越明显。坡度越陡侵蚀越明显,30°坡体保持较完整,而 60°坡体表面有较多的冲沟出现。

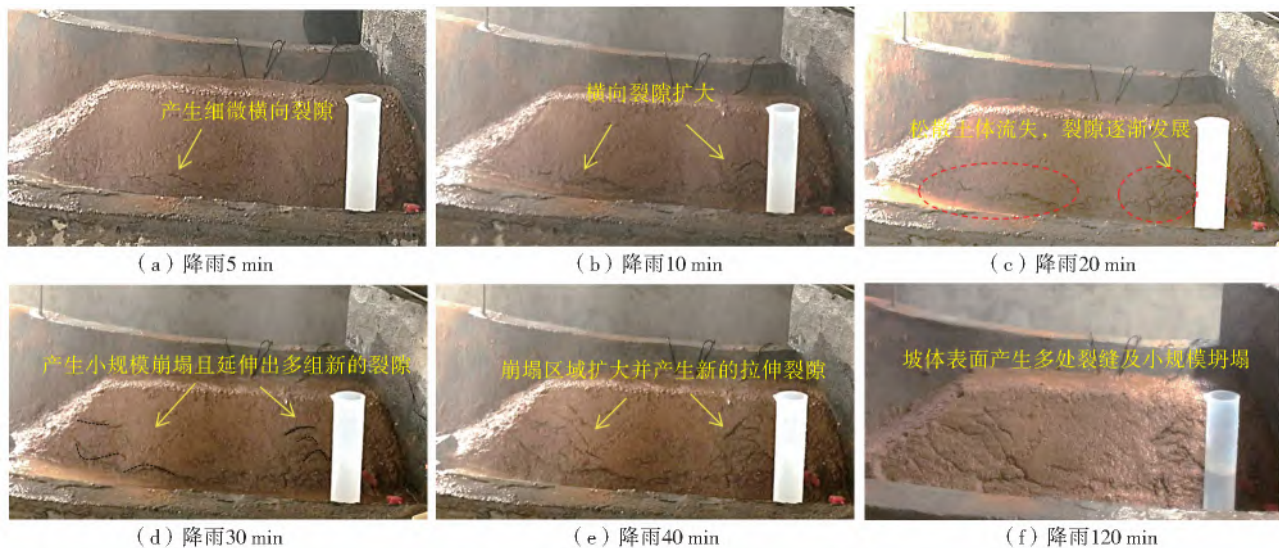


图 2 60°坡体不同时刻试验现象

Fig. 2 Experimental phenomena of 60° slope at different times

3.1.2 不同坡体材料坡体变化特征

为揭示不同材料对临水岸坡稳定的影响,对工

况 2、4、5 进行对比分析,以上 3 组坡度均为 45°,含砂率分别为 0(黏土)、20%、40%,见图 3。

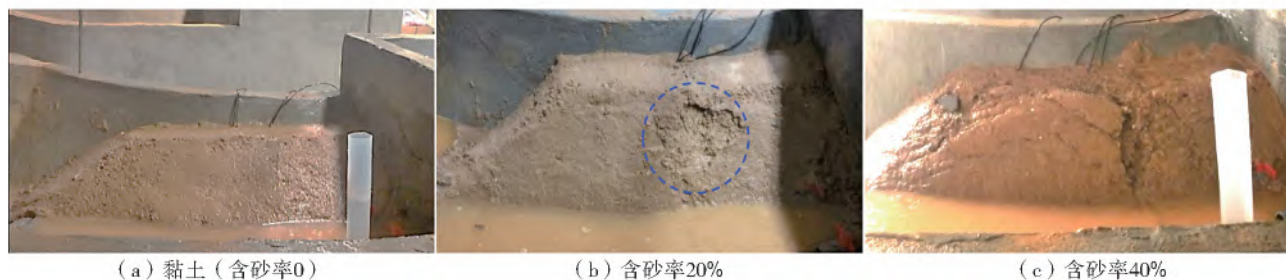


图 3 试验结束时各材料坡体

Fig. 3 The phenomenon of slopes with different materials after the experiment

图 3 为不同含砂率临水岸坡的破坏情况。试验过程中,黏土坡体整个试验过程中几乎没有明显破坏(图 3(a));20%含砂率坡体在降雨 40 min 后,坡体产生冲刷破坏,随着降雨历时增长破坏逐渐变大,最终产生 1 处较大崩塌(图 3(b));而 40%含砂率坡体在降雨 5 min 就产生了明显拉伸裂缝,并且在 70 min 左右坡体中部产生 1 条冲刷槽,随着降雨时间增长逐渐变长变宽,降雨结束后破坏明显(图 3(c)):产生破坏时间含砂率 40% > 20% > 0。试验发现:随着坡体含砂率的增加,雨水渗透性能变强,坡体稳定性也随之降低,黏土坡体稳定性最好,整个降雨过程中坡体稳定,未产生明显裂缝;含砂率 20%的坡体在降雨过程中逐渐产生许多细小裂缝,随后引起了一处较大滑坡;而含砂率 40%的坡体在降雨初期便迅速产生多组裂隙且大量土体随

雨水冲刷流失,随着降雨历时增长,裂隙逐渐扩大进而引发多处滑坡,降雨结束后坡体整体产生了明显变化(图 4)。同样地,各个配比的坡体在降雨结束后都产生了一定程度的下滑,其中,坡体含砂率越高,下滑越明显。

图 4 为 40%含砂率坡体不同时刻的岸坡失稳情况。在静置过程中,水面以上坡岸存在 5 cm 左右湿润现象,坡面产生一条明显横向裂隙(图 4(a));降雨 5 min 后,坡体逐渐湿润重度变大,在裂隙上方很快又产生一条新的横向裂隙(图 4(b));降雨 20 min 后,裂隙逐渐扩大,引发了小规模崩塌且表层松散土体在雨水冲刷下不断流失(图 4(c));降雨 45 min 后,裂缝伸展交会,崩塌现象加剧(图 4(d));降雨 70 min,雨水在坡顶汇聚流下形成一条纵向的冲蚀沟,坡面大量土体流失(图 4(e));随着降雨时间增

长,纵向冲蚀沟逐渐扩大至约 3 cm 宽,雨水冲刷作用更显著,周围不断产生新的裂缝和坍塌,降雨末期

时,坡体表面已产生多处明显破坏,且坡体整体下滑明显,坡角由 45°降为约 37°(图 4(f))。

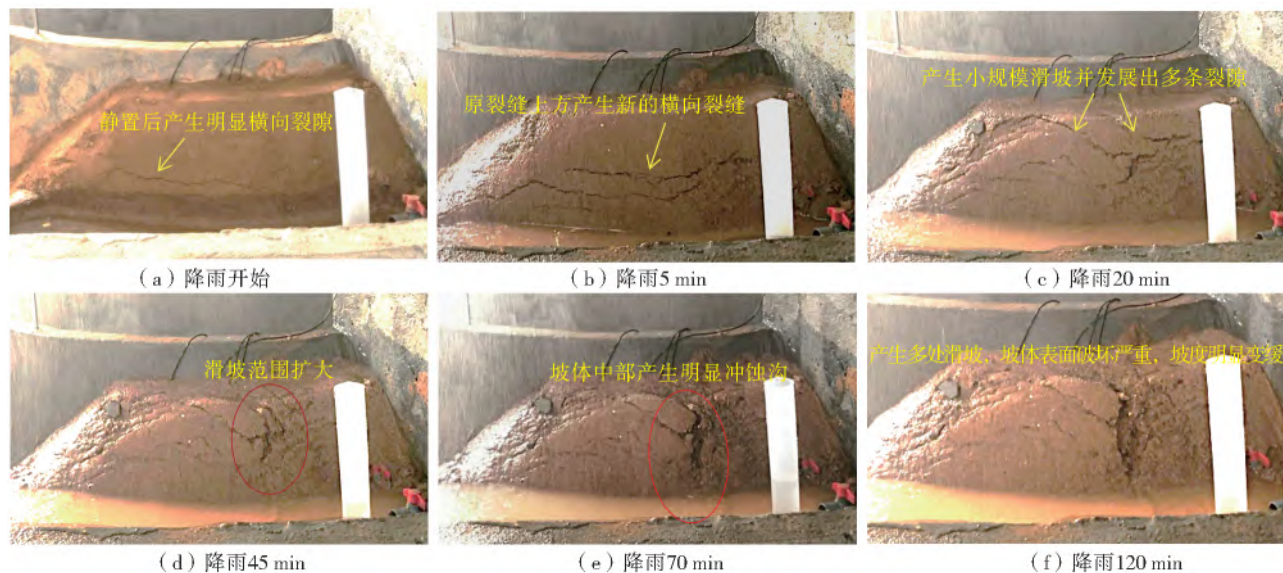


图 4 40%含砂率坡体不同时刻试验现象

Fig. 4 Experimental phenomena of 40% sand content slope at different time

3.2 监测数据

3.2.1 不同坡度坡体监测结果

不同坡度工况下各测点土压力变化特征见图 5。坡体内部土压力对降雨的响应规律基本保持一致,各坡度的土压力变化都经历了先快后慢的过程,在降雨初期,2 处测点的土压力都明显上升,但在降雨 1 h 后变化就逐渐变慢,之后基本保持平稳。在降雨过程中,坡体土体由非饱和和逐渐向饱和状态发展,土压力计上覆土体重度增大,土压力随之增大。图 5(a)所示,测点 1 处在降雨前期增长趋势明显,随着降雨时间增加,变化趋势也逐渐变缓且由于临近水面,前期对降雨响应迅速且随着坡度变大,土压力响应更快:60°坡体土压力在降雨初期 30 min 迅速由 2.28 kPa 增长至 2.91 kPa,之后缓慢增加最终达到最大值 3.09 kPa(3-1);45°坡体土压力在前

60 min 迅速由 2.11 kPa 增长至 2.78 kPa(2-1);而 30°坡体土压力则在 80 min 左右由 2.36 kPa 增长至 2.95 kPa 之后增长变缓(1-1)。2 h 降雨结束后,各坡度土压力均略微下降且 60°坡体下降速度最快,主要原因是坡陡雨水流失较快且下渗水压力减低。图 5(b)所示,测点 2 处变化趋势与测点 1 处类似。60°坡体土压力在降雨前 30 min 迅速由 2.14 kPa 增长至 2.82 kPa,之后缓慢增加最终达到最大值 2.96 kPa(3-1);45°坡体土压力在前 40 min 迅速由 1.70 kPa 增长至 2.25 kPa(2-2);而 30°坡体土压力则在 60 min 左右由 2.22 kPa 增长至 2.63 kPa(1-2)。主要原因是降雨初期,坡体上部土体含水量低,降雨初期雨水入渗迅速增加了坡体重力,而随着降雨时间增长,降雨入渗难度变大,雨水主要沿坡面汇聚流下,对坡体的土压力影响也逐渐变小。

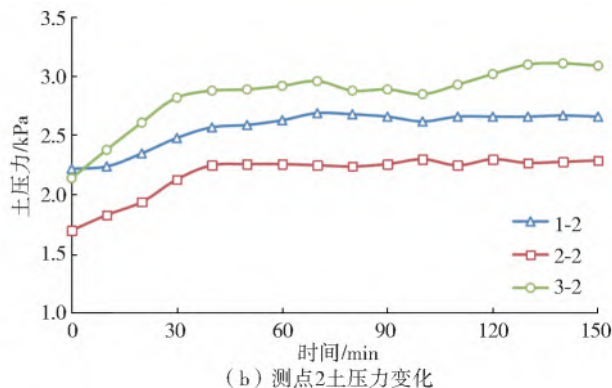
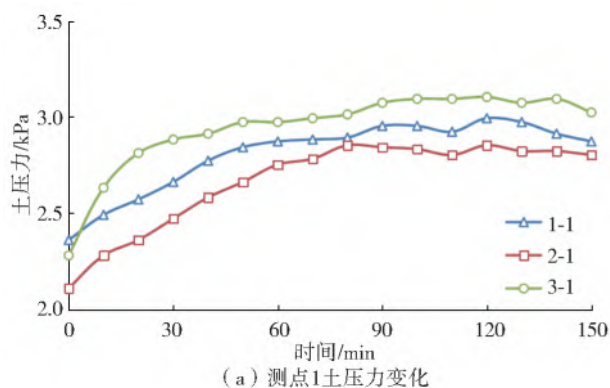
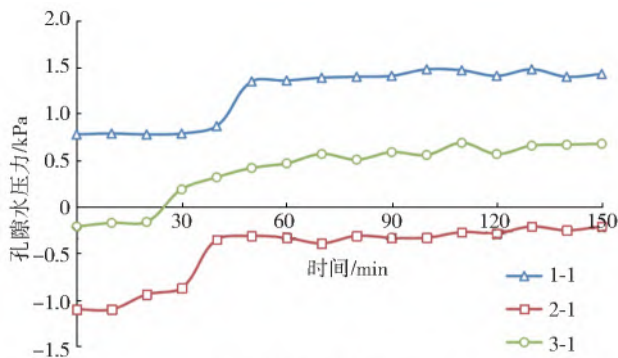


图 5 不同坡度土压力变化特征

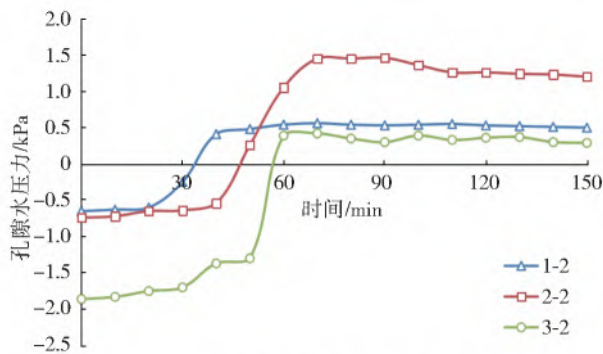
Fig. 5 Change characteristics of soil pressure on the slope with different angles

不同坡度工况下各测点孔隙水压力变化特征见图6。各坡度孔隙水压力随降雨历时变化规律大致相同,大体呈现迅速上升到逐渐稳定2个阶段。雨水入渗使坡体内形成局部饱和,引起孔隙水

压力变化,同时坡度越大响应速度越快,结合各坡度坡体在降雨过程中的试验现象,说明坡度越大,越容易导致坡体发生胀缩效应,形成了拉张裂缝利于雨水入渗。



(a) 测点1孔隙水压力变化



(b) 测点2孔隙水压力变化

图6 不同坡度孔隙水压力变化特征

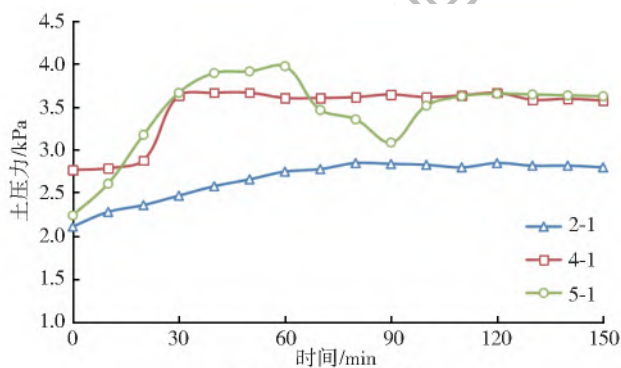
Fig. 6 Change characteristics of pore water pressure on the slope with different angles

图6(a)所示,在测点1处,坡脚处表层土体经过了2 h充分浸泡,孔隙水压力较稳定,因而坡体内孔隙水压力随降雨历时变化较小;30°坡体在前40 min孔隙水压力变化平缓,之后40 min迅速由0.78 kPa增长至1.40 kPa(1-1);45°坡体在前30 min孔隙水压力变化平缓,之后迅速由-1.10 kPa增长至-0.31 kPa(2-1);而60°坡体在20 min左右时就开始迅速增长,由-0.21 kPa增长至0.59 kPa(3-1),坡体对降雨响应速度为60°>45°>30°。原因主要是坡度增大,雨水下渗速度变快。图6(b)所示,测点2位于坡体上部,土体本身含水率低,降雨后孔隙水压力变

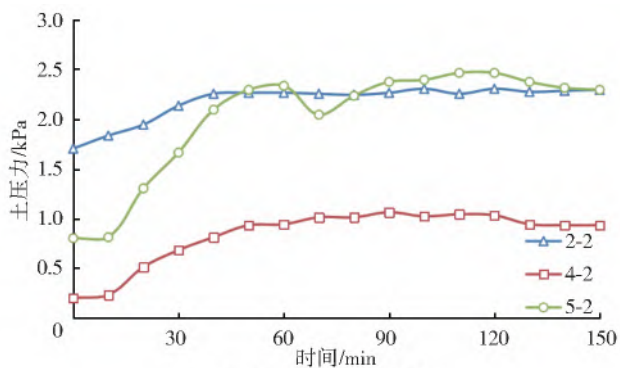
化量均高于测点1,其中:60°坡体孔隙水压力在50 min时迅速由-1.37 kPa增长至0.39 kPa(3-2);45°坡体在45 min左右时由-0.54 kPa增长至1.45 kPa(2-2);而30°的坡体由于较平缓,更利于雨水入渗,因此孔隙水压力变化响应最快,在30 min时由-0.25 kPa迅速增长至0.54 kPa(1-2)。

3.2.2 不同坡体材料坡体监测结果

在不同坡体材料工况下各测点土压力变化特征见图7。含砂坡体的稳定性要稍差于黏土坡体,降雨中期会产生明显崩塌,因而含砂坡体土压力都会在降雨中后期发生明显的降低现象。



(a) 测点1土压力变化



(b) 测点2土压力变化

图7 不同坡体材料土压力变化特征

Fig. 7 Change characteristics of soil pressure on the slope with different slope materials

图7(a)所示,测点1处,黏土坡体稳定性良好,土压力随着降雨历时增长持续缓慢上升,在前60 min较快增长,由2.11 kPa增长至2.78 kPa;而20%含砂率的坡体雨水渗透性优于黏土坡体,雨水入渗更快,在降雨30 min左右土压力就由2.77 kPa迅速增长至3.67 kPa,但随后由于土体流失加快,土压

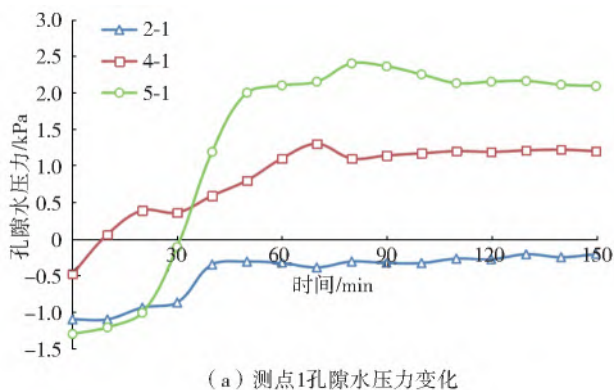
力增长变缓,之后趋于平稳;40%含砂率坡体则由于坡体稳定性最差,雨水更易渗透进坡体,降雨60 min后土压力迅速增长至3.98 kPa,但由于坡体材料自身黏聚力较差,大量表层土体被雨水冲刷滑落,同时在降雨中期产生多处破坏,因此土压力70 min左右时骤降至3.09 kPa,之后随破坏结束又缓慢回升。

图 7(b)所示,测点 2 处,土压力变化规律大致相同,都是在降雨初期增长趋势明显,随着降雨时间增加,坡体产生了不同程度的破坏及位移,土压力也产生了明显的降低。其中:20%含砂率坡体土压力在前 80 min 时迅速由 0.20 kPa 增长至 1.04 kPa;40%含砂率坡体在前 60 min 左右时由 0.80 kPa 增长至 2.33 kPa,而黏土坡体则稳定性良好,未产生明显裂隙及滑坡,因而一直保持缓慢上升,在 40 min 左右时由 1.70 kPa 增长至 2.26 kPa 之后保持平稳直到降雨 2 h 结束。

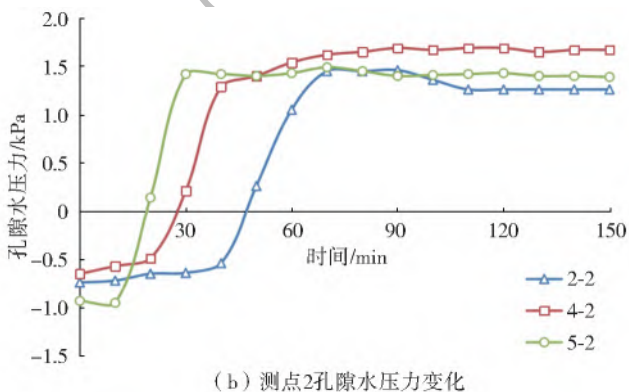
不同坡体材料工况下各测点孔隙水压力变化规律见图 8。含砂坡体孔隙水压力对降雨的响应较灵敏,且含砂率越高,对降雨响应越快。

在测点 1 处,由于降雨前经过了充分浸泡,孔隙水压力已经较稳定:黏土(含砂率 0)坡体由于渗透性差,降雨初期响应慢,随着时间增长,孔隙水压力在 30 min 左右时由 -1.10 kPa 增长至 -0.31 kPa,之

后基本保持平缓;含砂率 20%坡体在降雨开始后迅速增长,由 -0.48 kPa 增长至 1.17 kPa;而含砂率 40%的坡体在降雨开始后有明显上升,并在降雨 20 min 左右就由 -1.30 kPa 迅速增长至 2.40 kPa。测点 2 处变化规律与之前大致相同,都经历了平缓—骤升—平缓等 3 个过程。其中:黏土坡体在降雨前 40 min 孔隙水压力保持 -0.72 kPa 左右几乎无变化,40 min 之后迅速上升,70 min 时接近孔隙水压力最大值 1.46 kPa;20%含砂率坡体响应速度稍快,20 min 左右孔隙水压力由 -0.57 kPa 开始上升,最终 60 min 左右时孔隙水压力增长至 1.62 kPa;而 40%含砂率坡体响应最快,降雨 10 min 开始由 -0.93 kPa 迅速增长,30 min 左右时达到 1.49 kPa。由于坡体上部含水率低,3 种坡体孔隙水压力变化均较大,且含砂率越高,渗透性能更好,对降雨的响应速度也更快,即含砂率 $40\% > 20\% > 0$ 。



(a) 测点1孔隙水压力变化



(b) 测点2孔隙水压力变化

图 8 不同坡体材料孔隙水压力变化特征

Fig. 8 Change characteristics of pore water pressure on the slope with different slope materials

3.3 机理分析

在降雨开始后观察到坡面有部分土颗粒随雨水下滑,且含砂率越高的坡体现象越明显,其主要原因在于试验材料的自身物理性质,土颗粒间的黏聚力较小,因此表层土体受到雨滴的击溅作用,土颗粒间的胶结作用被破坏,一部分松散土颗粒将被溅起的水带走^[21-22]。

降雨初期坡表土体处于非饱和状态,土体入渗能力大于降雨强度,雨水是自由入渗,对于非饱和土,在水气界面形成的收缩膜张力作用下,土的抗剪强度会额外增高,此时坡面相对稳定。但随着降雨历时的增长,坡表土体逐渐饱和,土体入渗能力越来越小,当土体入渗能力小于降雨强度时,来不及下渗的雨水则会沿前缘最不利处汇流冲刷形成坡面径流,多数失稳破坏都发生在此时,其中 40%含砂率的试验坡体就是在持续降雨下来不及下渗的雨水沿

坡面源源不断汇入径流中,最终在径流的作用下,坡面形成一道由上至下发育的冲蚀沟(图 4(e)),之后冲蚀沟逐渐扩大并在周围产生多处裂缝和坍塌。这一方面是由于降雨入渗,土体含水率增大,土的抗剪强度随着基质吸力的减小而降低,同时土体重度增大,坡体下滑力也增大;另一方面,雨水在坡体内部的渗流管网流动,产生的渗流力也导致下滑力增大,从而加速了坡体的失稳破坏^[23]。

4 结论

针对不同边坡坡度和坡体材料,在相同河道水深及降雨条件下开展了 5 组模型试验,观察临水岸坡破坏过程并分析其内部土压力与孔隙水压力的变化规律,通过上述研究,得出以下结论。

(1)岸坡在雨水入渗的情况下,重度增加,下滑力增大,同时,其抗剪强度又因含水率增加而急剧下

降,这是降雨诱发岸坡失稳的根本原因。

(2)边坡坡度对坡体稳定具有较大影响,坡表在降雨作用下迅速饱和,抗剪强度大幅降低,稳定性劣化,而坡度越大受降雨下渗越深,下滑力增加,对稳定性不利,60°坡体在降雨 10 min 就开始产生破坏,而 30°坡体未产生明显破坏。

(3)边坡材料性质对坡体稳定影响较大,不同材料的坡体渗透性能不同:当坡体含砂率为 40%时渗透性能最大,坡体在 5 min 就开始产生破坏且压力变化响应速度快,岸坡失稳的概率更高;当坡体为黏土时的渗透性最小,未产生明显破坏且坡内压力变化响应最慢,降雨对边坡稳定性的影响有限。

本研究只考虑了 1 种降雨工况,其可能对研究结果产生一定的影响,后续将对不同降雨工况诱发临水岸坡失稳开展进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 夏军强,邓珊珊,周美蓉,等.长江中游河道床面冲淤及河岸崩退数学模型研究及其应用[J].科学通报,2019,64(7):725-740. (XIA J Q, DENG S S, ZHOU M R, et al. One-dimensional coupled modeling of bed evolution and bank erosion processes in the Middle Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(7): 725-740. (in Chinese)) DOI:10.1360/N972018-01147.
- [2] 李均辉,李健.长江江西段岸坡崩塌及其对防洪大堤的影响[J].长江流域资源与环境,2003,12(6):557-562 (LI J H, LI J. Bankslope caving and its influence on the flood bank in Jiangxi section of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(6): 557-562. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-8227.2003.06.011.
- [3] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 135-143. DOI:10.1016/j.enggeo.2010.04.010.
- [4] 徐全,谭晓慧,辛志宇,等.降雨入渗条件下非饱和土质边坡的稳定性分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(7):984-991. (XU Q, TAN X H, XIN Z Y, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 38(7): 984-991. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2015.07.023.
- [5] 郭群善.近 50 年长江中下游地区旱涝时空分布[J].南水北调与水利科技,2016,14(4):72-76. (GUO Q S. Drought-flood temporal and spatial distribution in middle and downstream area of the Yangtze River over past 50 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 72-76. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2016.04.012.
- [6] THOMAS J T, IVERSON N R, BURKART M R. Bank-collapse processes in a valley-bottom gully, western Iowa [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 34(1):109-122. DOI:10.1002/esp.1699.
- [7] 包承纲,李青云.关于崩岸研究和预测的若干意见[J].水利水电科技进展,2003,23(1):14-16. (BAO C G, LI Q Y. Several opinions on bank collapse research and prediction[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(1): 14-16. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2003.01.005
- [8] 陈剑,杨志法,李晓.三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3052-3057. (CHEN J, YANG Z F, LI X. Relationship between landslide probability and rainfall in Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3052-3057. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2005.17.008.
- [9] FINLAY P J, FELL R, MAGUIRE P K. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6):811-824. DOI:10.1139/t97-047.
- [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,1999,20(1):1-14. (WU H W, CHEN S Y, PANG Y W. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1-14. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:YTLX.0.1999-01-000.
- [11] SONY P, AHMAD R, KABUL B. et al. Determination of unsaturated soil properties and slope deformation analysis due to the effect of varies rainfall [J]. Procedia Engineering, 2015, 125(5): 376-382. DOI:10.1016/j.proeng.2015.11.090.
- [12] 姚海林,郑少河,李文斌,等.降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1034-1039. (YAO H L, ZHENG S H, LI W B, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1034-1039. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2002.07.019.
- [13] RAM K R, KWANSUE J, HAJIME N, et al. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall [J]. Catena, 2014, 122: 27-41. DOI:10.

- 1016/j. catena. 2014. 06. 001.
- [14] 苏永华,李诚诚.强降雨下基于 Green-Ampt 模型的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 389-399. (SU Y H, LI C C. Stability analysis of slope based on Green-Ampt model under heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 389-399. (in Chinese)) DOI:10.16285/j. rsm. 2019. 0001.
- [15] 张华庆,谭佳佳,左殿军. 降雨入渗对软土岸坡稳定性影响研究[J]. 水运工程, 2014, 490(4): 148-155. (ZHANG H Q, TAN J J, ZUO D J. Stability study of unsaturated soft soil slopes under rainfall infiltration [J]. Port & Waterway Engineering, 2014, 490(4): 148-155. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1002-4972. 2014. 04. 030.
- [16] WON T O, SAI K, VANAPALLI. Influence of rain infiltration on the stability of compacted soil slopes [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(5): 649-657. DOI:10.1016/j. compgeo. 2010. 04. 003.
- [17] 张赣萍,谢振东. 长江江西九江永安堤段环境地质问题分析[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(1): 24-27. (ZHANG G P, XIE Z D. Analysis of environmental geology problems for Yong'an Dyke of the Yangtze River in Jiujiang County, Jiangxi Province[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(1): 24-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1672-4135. 2008. 01. 005.
- [18] 刘祥玉,刘晓辉,高清洋,等. 长江中下游顺直河道水流冲刷引发崩岸的模拟试验[J]. 水运工程, 2019, 554(4): 90-97. (LIU X Y, LIU X H, GAO Q Y, et al. Simulation experiment of bank collapse caused by scouring in straight river section in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2019, 554(4): 90-97. (in Chinese)) DOI: 10.16233/j. cnki. issn1002-4972. 20190408. 014.
- [19] 金腊华,石秀清,王南海. 长江大堤窝崩机理与控制措施研究[J]. 泥沙研究, 2001(1): 38-43. (JIN L H, SHI X Q, WANG N H. Research on the mechanism and control measures of dike pit-type slide in the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2001(1): 38-43. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j. cnki. 0468-155x. 2001. 01. 006.
- [20] 江泊洳,饶锡保,张伟,等. 荆江大堤下伏饱和粉细砂最大动剪模量经验估算[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 4384-4390. (JIANG J W, RAO X B, ZHANG W, et al. Empirical estimates of maximum dynamic shear modulus of saturated fine sand in JingJiang levees[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 4384-4390. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2014. s2. 124.
- [21] NIELSEN P. Bed shear stress, surface shape and velocity field near the tips of dam-breaks, tsunami and wave runup [J]. Coastal Engineering, 2019(152): 126-131. DOI: 10.1016/j. coastaleng. 2018. 04. 020.
- [22] 杨涵苑,李志威. 基于流量过程的若尔盖黑河下游崩岸规律研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(4): 33-42. (YANG H Y, LI Z W. Processes of bank collapse in lower black river on zoige plateau based on the hydrograph [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(4): 33-42. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slf dx. 20190404
- [23] 李俊,陈宁生,刘美,等. 2000 年易贡乡扎木弄沟滑坡型泥石流主控因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 187-193. (LI J, CHEN N S, LIU M, et al. Analysis of main factors for landslide-triggered debris flow in Zhamunong gully on April 9th, 2000 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 187-193. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0170.

Experiment on water bank instability under rainfall

LI Lianghai¹, LUO Xing¹, ZHAO Xu¹, LEI Sheng², XU Fugang^{1,2}

(1. School of Architectural Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangxi Water Conservancy Research Institute, Nanchang 330029, China)

Abstract: Bank slope instability is a common geological hazard, which extremely threatens people's property and life in China. Rainfall is an important cause of bank slope instability, and the slope angle and the slope material directly control the stability of the bank slope. Therefore, it is meaningful to study the influence of slope angle and slope material on bank slope stability under rainfall conditions.

To explore the influence of slope angle and slope material on the instability of water banks under heavy rainfall, 5 model tests were carried out by taking different slope angles, slope materials and the deformation characteristics of bank slope were observed at different times. The change of pore water pressure and earth pressure in different positions of the slope were monitored by a pore water pressure gauge and earth pressure gauge.

By comparing the failure process of 5 model tests at different times, the results showed that heavy rainfall had a significant

effect on the stability of the slope surface structure. Under the action of rainfall, the surface structure rapidly saturated, the shear strength was greatly reduced and the stability deteriorates. However, the internal structure was less affected because the water was difficult to penetrate. At 60° slope angle, there were obvious cracks in the bank slope after 10 minutes of rainfall, and the cracks became larger as the rainfall time increased. After 2 hours of rainfall, the slope angle changed from 60° to 47° , and there were many obvious cracks on the surface of the bank slope. When the slope angle was 30° and 45° , there was no obvious damage on the bank slopes. The change in bank slope with different slope materials was also significantly different. There was little obvious damage to the clay slope during the whole test. When the sand content was 20%, the bank slope had erosion damage after 40 minutes of rainfall, and as the rainfall time increased, the damage gradually increased. Eventually, a collapse occurred on the surface of the bank slope when the sand content was 40%, and it was also noted that the bank slope had obvious cracks after 5 minutes of rainfall. About 70 minutes, there was a scour groove in the middle of the bank slope, which gradually widened with the increase of rainfall time.

Under the rainfall, the bank slope became heavier and the sliding force increased. Moreover, with the increase of the water content of the bank slope, the shear strength decreased sharply, then induced bank slope instability. The slope angle had a great influence on bank stability. The bigger the slope angle, the deeper the rain seep, and the sliding force and infiltration force become stronger, which was not conducive to the stability of the bank slope, the influence was $60^\circ > 45^\circ > 30^\circ$, respectively. The slope material affected the bank slope stability directly, and different materials had different permeability. When the sand content was 40%, the permeability was best, and bank slope was damaged at 5 minutes and the response of pore water pressure was fast, the instability probability was higher with the worst permeability. When the bank slope was pure clay, and no damage obviously, and the response of pore water pressure was slow, the impact of rainfall on bank slope stability was low relatively.

Key words: water bank; rainfall infiltration; model test; slope angle; slope material

(上接第 749 页)

Dongting Lake and water of the lake district, respectively, and the most serious area of sediment pollution in rivers was seriously polluted and high potential ecological risk in Dongting Lake valley. Ni, Cr, Cu and Zn were heavy metals with moderate pollution and low risk. Pb and As were heavy metals with mild pollution and low risk. (3) According to the correlation analysis and principal component analysis, the seven kinds of heavy metal elements may be divided into three categories, including Cd and Zn, respectively, according to the situation of Dongting Lake basin's natural and human activity, Cd probably from pesticides, fertilizers and sewage may also come from steel manufacturing, paint, etc., Zn may come from zinc mining or rock weathering and erosion of minerals, and As were the third category and may belong to natural sources. Based on the results of this study, it was suggested that the next step should be the regional classification of pollution levels in Dongting Lake. The environmental protection inspectors and other relevant departments are urged to strengthen the control of Cd input from sources inside and outside the river basin. Comprehensive measures of ectopic or in situ treatment should be adopted. The ecological restoration of Dongting Lake sediments was carried out to eliminate the heavy metal pollution of sediments and improve the overall ecological environment level.

Key words: Dongtinghu Lake basin sediment; distribution of heavy metals; pollution evaluation; source of inquiry