

唐红梅, 周云涛, 李俊男. 库水升降作用下的类土质岸坡变形与破坏试验分析[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 74-79. [TANG Hongmei, ZHOU Yuntao and LI Junnan. Analysis on Deformation and Failure Based on Test Model of Earthy-soil Bank Slope under Reservoir Water Level Fluctuation[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 74-79. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.015.]

库水升降作用下的类土质岸坡变形与破坏试验分析*

唐红梅¹, 周云涛², 李俊男¹

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 三峡库区类土质岸坡广布, 受库水位升降、浸泡等影响, 其变形与破坏演化过程极为复杂, 其防治十分困难。基于3D激光扫描技术, 通过对库区水库运行期间类土质岸坡模型试验模拟其变形与破坏, 进行分析获得了类土质岸坡变形破坏演化特征: 蓄水浸泡软化诱发类土质岸坡变形破坏具有突发性特征, 岸坡破坏发生在坡脚低水位有限的30%浸泡区域, 且呈现渐进性破坏模式, 孔隙水压力曲线变现为相对稳定、波动以及稳定增长3个阶段, 此波动是库岸裂纹发育的直观表征; 受库水浸泡作用影响使类土质岸坡坡中出现沉降变形位移显著, 位移监测显示在高水位线附近监测的位移出现突变, 在岸坡后缘形成卸荷裂隙区域显著; 试验库水位降落时致坡内形成的渗透流驱动力显著, 诱发坡体内坡中位置产生大量平行裂缝, 朝坡脚局部发生偏转, 孔隙水压力曲线变化分为缓慢降低、快速下降和负孔隙水压力三个阶段, 负孔隙水压力阶段是岸坡裂纹快速贯通阶段; 再次蓄水浸泡使裂缝横向扩展贯, 加剧诱发类土质岸坡坡脚大面积破坏垮塌, 有可能形成整体性滑移。为进一步研究类土质岸坡变形破坏模式与防治具有一定借鉴意义。

关键词: 库水升降; 岸坡变形; 渐进破坏; 试验; 类土质岸坡

中图分类号: P642. 2; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0074-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.015

岸坡运动随地质历史时期不断变迁, 其演化过程极为复杂, 一直是岩土、地质学科的难点。目前, 许多学者对边坡、岸坡变形破坏演化作了大量探索, 如周创兵详细论述了水电工程高陡边坡生命周期演化与安全控制的学术思路与技术路线^[1]; 常宏等认为山地滑坡崩塌发生发展与河流地貌过程密切相关^[2]; 陈洪凯等提出了缓倾角边坡的后退演化的力学机制^[3]; 李景富等利用综合分析方法对清江隔河岩库区的岸坡稳定性进行了定量预测^[4]; 孟立朋等把岸坡结构与软硬相间岩组特征视为青干河岸坡的演化过程重要因素^[5]; 李晓鸿把扰动视为岸坡系统非线性演化的诱因^[6]; 何潇等从河谷边坡演化的地质力学阐明了崩滑灾害孕育发展过程和垂直分布特点^[7]; 周云涛等针对库区类土质岸坡, 提出了岸坡演化的5个阶段^[8]; 唐红梅等分析了巫山江东寺岸坡在库水升降过程中其库岸垮塌的原因, 采用PFC2D模拟了其过程^[9]。胡启军等通过模型试验和数值分析对长大顺层边坡的渐进多次滑移拉裂失稳模式进行了研究^[10]; 戴青松等基于离散元法获得了云龙山边坡的变形演化过程6阶段^[11], 严珍珍等基于质量守恒原理, 初始坡面简化直线型山坡形态, 利用有限元方法对坡面演化过程进行数值模拟研究^[12]。梁学战等通过模型试验, 分析了土质岸坡

在一个蓄水降水循环周期内裂缝体系的时空演化分布规律^[13]。对于激光技术在岩土工程的应用广泛, 刘强等利用三维激光扫描技术在煤矸石山复垦过程中解决土石方量、覆土量的植被量问题, 加快了工作进度, 节省时间和人力问题^[14]; 祝文婷将三维激光扫描技术应用在深坑岩壁精细勘测中^[15]。然而, 针对三峡库区类土质岸坡变形破坏地貌演化研究较少报道, 但分布广布, 破坏危害大, 防治困难, 本文针对三峡库区运行期间的类土质岸坡, 基于3D激光扫描技术, 通过模型试验观测岸坡变形破坏规律, 分析类土质岸坡地貌演化精细特征, 为进一步研究类土质岸坡变形破坏模式与防治具有一定借鉴意义。

1 模型试验

1.1 试验模型与试验土样

修筑模型槽尺寸为6.0 m(长)×4.0 m(宽)×4.0 m(高), 槽内筑斜坡视为基岩面, 坡度为35°, 槽周边采用防渗砂浆抹面做防渗处理。试验类土质土样填筑在斜坡上构成岸坡, 平均厚度50 cm, 平均坡角为40.2°。利用试验模型模拟三峡库水营

* 收稿日期: 2017-11-07

修回日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378521); 国家自然科学基金项目(51678097); 重庆市重点基金项目(cstc2013jjB30001)

第一作者简介: 唐红梅(1968-), 女, 重庆合川人, 博士, 研究员, 研究方向为岩土与地质工程。E-mail: hmtang6778@sina.com

运期库水位变化于 145 ~ 175 m 间(图 1)。

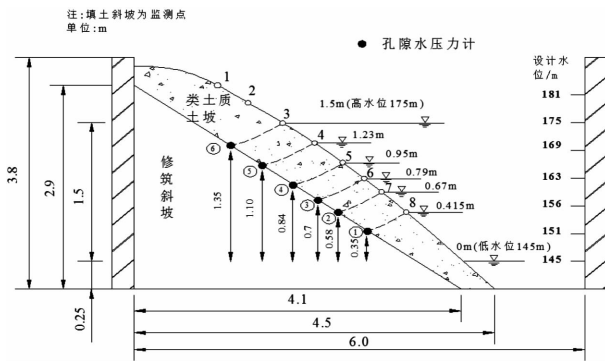


图1 岸坡模型尺寸

类土质岩体是由多条节理切割成非常破碎岩体,并经强烈风化作用形成的碎裂状岩体,碎裂状岩体表层视为经风化形成一层强度较低的包裹体,或经渗流作用将细颗粒带入碎裂岩体裂隙内填充(图 2)。类土质岩体级配粒径差异大,含有大块石和极细小的粘土颗粒构成,其碎屑颗粒表层包裹体富含高岭石、蒙脱石等亲水性矿物^[16]。



图2 龚家方类土质岸坡堆积体

遵循抗剪强度参数 c 、 φ 相同原则将类土质岩体作简化为粒径相同、似球体状,由基质和包裹体构成,视为类土质岩体颗粒紧密分布^[16](图 3)。

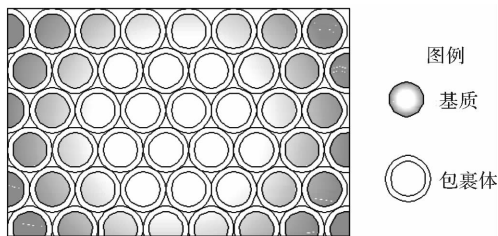


图3 类土质岩体等效模型示意图

选取库区典型类土质岸坡由多组结构面切割,经统计碎块直径为 25 ~ 200 mm 之间,粒间含有粒径极小的粘土颗粒,类土质岩体的强度与粗粒土颗粒强度近似。按照几何相似原理,把碎裂岩体尺寸按照比例此 1/20,基体粒径简化取 1 cm,把等粒径碎石为基质,以高岭土、粘土、水泥为包裹体。

试验的类土质土体按照体积配比为碎石:粘土:高岭土:水泥 = 4:3:1:0.14。试验碎石采用现场粒径大约 1 cm 的碎石近似替代,粘土为现场采取风干、筛分之后,选取粒径小于 5 mm 的粘土;水泥与高岭土则直接购买。土样制备时控制初始含水量为 4.2%,充分搅拌后制得类土质岩体(图 4)。填筑时控制容重为 19.5 kN/m³,孔隙率为

60.2%,经过层层压实填筑,填筑后的坡体如图 5 所示。

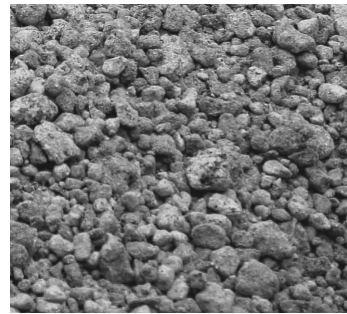


图4 制备完成的类土质岩体



图5 填筑完成的类土质坡体

1.2 试验工况与测试

依据三峡水库运行时间和水位变幅 30 m,把模型试验工况分为 5 个工况(表 1)。水位升、降速度均匀,实际水库运行库水位升降速度为 1 m/d,模型试验水位升降为实际库水位的升降速度的 6 倍,历时均见表 1。

本试验采用了徕卡 ScanStation C10 超高速三维激光扫描仪测量系统进行模型试验变形破坏量测数据,融合了高精度测角精度 8" 的测角测距技术、测距精度 1.2 mm + 10 ppm,精准可靠 WFD 波形数字化技术, Mixed Pixels 混合像元技术和 HDR 高动态范围图像技术,扫描最远距离达 270 m,扫描精准噪声低扫描速率高达 1 000 000 点/s,采用 1 550 nm 激光,提高了峰值功率,数据处理软件 Cyclone 对扫描的点云数据进行拼接、删除等处理,同时可获得位移、体积量。

表1 类土质岸坡试验工况

工况	模型试验 水位/m	对应正常的 库水位/m	升降速 率/(m/h)	历时/h
①初次水 升工况	蓄水 0 m→1.5 m	蓄水 145m→175m	0.25	历时 6.0h
②高水位 工况	高水位 1.5 m	库水位 175m	0	历时 22h
③水位降 工况	降水 1.5m→0m	降水 175m→145m	0.25	历时 6.0h
④低水位 工况	低水位 0m	低水位 145m	0	历时 22h
⑤第二次蓄 水工况	第二次蓄水 0 m→1.5 m	二次蓄水 145m→175m	0.25	历时 6.0h

试验时,从类土质岸坡填筑完毕到整个试验水位运行过程的关键阶段均采用了徕卡 ScanStation

表 2 模型试验蓄水阶段类土质岸坡裂纹发展演化记录

试验水位/cm	实际水位/cm	新生裂缝序号及发展变形迹象	裂缝长度/cm	坍塌体
0.0	145.00	①裂缝呈锯齿状,岸坡坡脚右侧	15.20	I 坍塌体
17.6	148.52	②裂缝,在①左侧,底部临空	20.30	II 坍塌体
19.5	148.90	③圆弧状,相继在坍塌体 I 后部左侧形成	11.00	III 坍塌体
23.2	149.64	④裂缝,分布在②裂缝的左侧	12.20	IV 塌体反倾
23.8	149.8	⑤裂缝,位于④裂缝左侧	30.30	V 坍塌,反倾,突发性整体
28.0	150.6	⑥圆弧状裂缝 ⑦裂缝快速产生	110.20 18.50	VI 坍塌体 VII 坍塌体
30.0	151.0	⑧圆弧状裂缝 8	33.80	VIII 潜在坍塌体
33.0	151.6	⑨裂缝形成于坡脚右侧裂缝	61.80	IX 坍塌体
43.0	153.6	⑩裂缝	41.12	X 小块坍塌
150	175	浸泡作用使沉降变形加剧,最大沉降达 5cm 整个阶段可清楚的观察到位于水面上侧的土体有毛细现象,毛细高度为 5cm 左右。		

C10 系统进行扫描,在坡面安设位移计观测变形,在基岩面安设了孔隙水压力计测孔隙水压力,配合高速摄像机、辅助仪器等进行测量裂缝的总长、深度、宽度、地点位置,记录不同裂缝、崩塌体行成并编号。试验过程中采用的高速摄像机进行实时拍摄,观察裂缝扩展情况。

2 类土质岸坡地貌精细演化特征分析

将试验工况长时间观察到的裂缝与坍塌体绘制图 6 所示,类土质岸坡受试验水位在升、降作用及再次循环蓄水的影响,发育形成了 19 条裂缝和 13 个坍塌体,导致岸坡在低水位坡脚处附近形成大面积垮塌,浸泡致整个类土质岸坡坡体产生显著沉降,许多微裂纹集中于岸坡后缘。

2.1 初次库水上升蓄水土质岸坡地貌演化特征分析

图 5 为蓄水前,填土岸坡坡面总体为平顺光滑的,岸坡后缘坡度小,相对平缓,坡中、坡脚均比较平顺,图 7 为基于 3D 激光扫描技术生成的原填筑类土质岸坡坡面的模型图,从颜色看出坡面光滑。随模型试验蓄水位的增加,裂纹相继出现,变形破坏致坍塌体形成(表 2),随坍塌逐步形成,底部临空,坡脚处呈现崩塌趋势的反倾坡体,不断有颗粒掉落。

当试验水位达到 28 cm 时形成位于坡体左侧长度 110 cm 左右的圆弧状裂缝 6,导致产生坍塌体 VI,在此坡脚呈现反倾坡体,能观察到下部干燥的土颗粒逐渐被浸润;裂缝 7 在很短时内产生,导致产生坍塌体 VII 很快形成,其深度较大,反倾角达近 80°,水体迅速进入坡体并浸润,同时可见毛细作用(图 8);试验水位达 29.5 cm 时,圆弧状裂缝 8 形成,长度约 34 cm,位于裂缝 7 下部(图 6),致潜在坍塌体 VIII 产生;水位上升到 33 cm 时,裂缝 9 形成于坡脚右侧裂缝 1、3 附近,长度约 62 cm,同时致坍塌体 IX 产生,不断地有颗粒掉落;水位抬升至 43 cm 时,裂缝 10 形成,快速生成小块坍塌 X;当水位升高到 150 cm 时,其水位下坡体岩土体浸泡软化作用使坡面沉降变形加剧,监测 3

显示最大沉降量达 5 cm(图 1);整个蓄水阶段可清楚的观察到位于水面上侧的土体毛细现象显著,其高度可达 5 cm 左右。

库水位升工况时通过测试获得的孔隙水压力曲线变化可分为相对稳定、波动以及稳定增长 3 个阶段,相对稳定阶段的孔隙水压力值随水位高度增大呈非线性增加趋势,波动阶段表现为孔隙水压力降低且出现负孔隙水压力现象(图 9),此波动是库岸裂纹发育的直观表征。库水位升降致使库岸坡内水位具有明显滞后现象,土体浸泡软化是岸坡破坏的重要诱发因素。

从图 6 知,水库初次蓄水浸泡致类土质岸坡变形破坏过程演化特征如下:

(1)蓄水浸泡软化致类土质岸坡破坏短时内完成,具有突发性,蓄水诱发类土质岸坡破坏集中发生在坡脚有限 30% 范围内。试验水位升至 17.5 cm 时,在岸坡坡脚快速形成裂缝 1,其裂缝迅速扩展形成坍塌体 I;水位抬升致 19.5 cm 时裂缝 2 形成,瞬时产生坍塌体 II;裂缝 1~10 形成与坍塌体 I~X 的垮塌在蓄水 52 min 内完成,仅占蓄水总时间的 14.4%,缘于类土质岸坡粘聚力低、内部结构面切割太多,遇水其强度降低很快有关。据图 6 知,坡脚 0~45 cm 范围内产生了大量的裂缝和坍塌体,而垂向超过 45 cm 上的类土质坡体没有明显破坏的特征,表明库蓄水上升浸泡软化对岸坡的诱发破坏作用是集中在坡脚低水位 30% 有限范围,集中体现坡体浸泡软化区域有限。

(2)蓄水浸泡软化引致类土质岸坡变形破坏呈现出渐进性破坏模式。据图 6 知,岸坡坡脚破坏坍塌有纵向坡体右侧 I→III→II→IX 和坡体左侧 IV→V→VI→VII→VIII→X 两个区段渐进性破坏过程,前者形成的坍塌体临空面为后者的坍塌体提供条件,裂纹联合扩展贯通依次发生破坏。

(3)蓄水浸泡软化诱发类土质岸坡后缘产生明显的卸荷裂隙区,坡肩拉裂区已经形成(图 6、图 10)。岸坡蓄水水位稳定至高水位时,水位的岸坡坡体受水浸泡与软化作用致其坡肩、坡中位置沉降显著,使该水位上下的坡体发生不连续变形,高出该水位的坡体颗粒发生滚落,生成微裂纹。随卸荷区裂纹扩展致后缘裂纹的延伸扩展,裂缝

向深部延伸, 与横向结构面联合贯通使岸坡发生整体滑移。

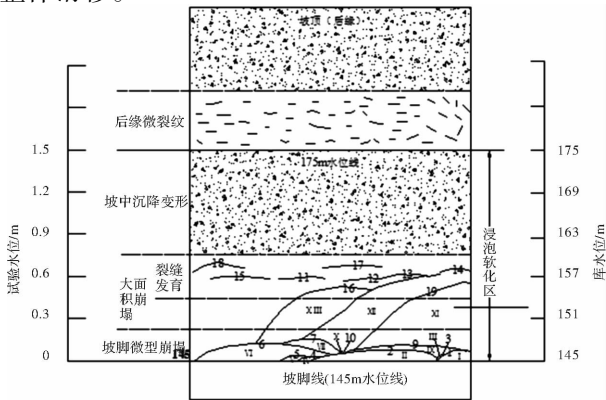


图6 库水升降期间类土质岸坡模型地貌形迹示意图

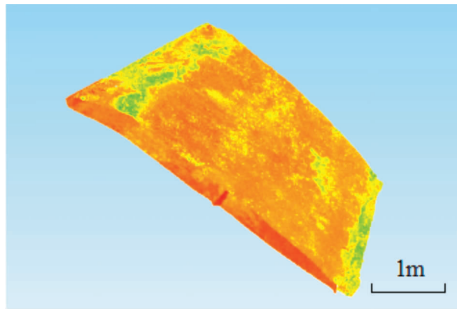


图7 原填筑类土质岸坡坡面形迹(3D激光技术)

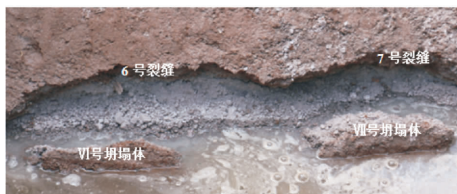


图8 VI号、VII号坍塌体照片

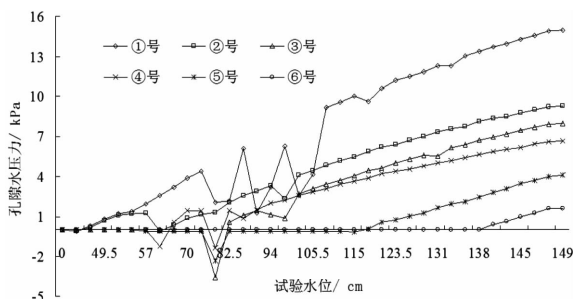


图9 库水位升工况的孔隙水压力曲线

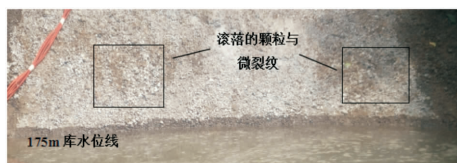


图10 岸坡后缘滚落颗粒与微裂纹

2.2 库水位降落类土质岸坡地貌演化特征分析

试验水位工况(图6)由150 cm降至80 cm时, 高

水位以上未浸泡区域的坡度变陡, 部分颗粒发生滚落, 产生一些微裂纹, 试验高水位以下坡体类土质岩体基体沉降到土颗粒中; 试验水位从80 cm→47 cm间, 坡体右侧最早出现多层分布的微裂纹, 折线型裂缝11、12、13、14近同时形成, 长度分别为10 cm、51 cm、15 cm、41 cm, 裂缝15由12、13裂缝贯通后导致产生, 长度近50 cm, 这些裂缝近似连接近为直线, 不断加深扩宽, 最大裂缝宽度为3 cm。

试验水位47 cm→0 m期间, 裂缝16、17分别位于裂缝11、12的下方和上方, 裂缝开度均较小; 圆弧形裂缝18位于边坡左侧中下部, 延伸扩展到裂缝11、15(图6)。

当试验水位降落至低水位0 cm时, 有崩塌物堆积于试验坡脚处, 产生新的小坡体, 坡脚平缓约为30°, 通过3D激光扫描技术处理可见, 通过3D激光软件Cyclone9.0中TIN Volume模块, 获得坡脚坍塌体总变形破坏量为0.091 m³, 显示一条大裂纹已经贯通(图11)。

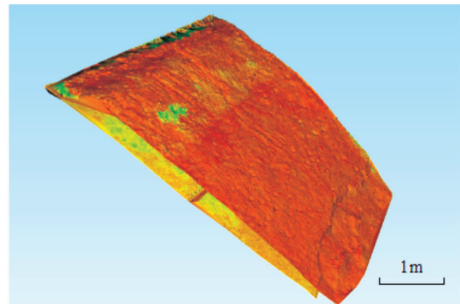


图11 库水位下降至坡脚后岸坡坡面形迹(3D激光技术)

降水位降工况时各孔隙水压力曲线变化分为缓慢降低、快速下降和负孔隙水压力三个阶段, 缓慢降低阶段, 孔隙水压力呈非线性降低趋势, 在试验水位139 cm位置, 即坡肩位置, 水位降低速率发生突变, 降低速率增大, 与坡肩拉应力集中有关, 负孔隙水压力阶段是岸坡裂纹快速贯通阶段, 即急剧破坏阶段(图12)。

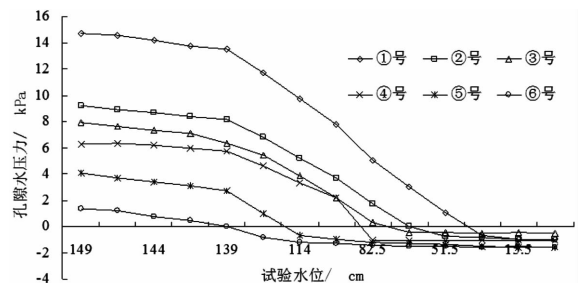


图12 降水位降工况孔隙水压力曲线

从图6知, 库水降落类土质岸坡变形破坏过程如下:

(1) 试验水位高程150 cm~52 cm间受库水浸泡作用影响致类土质岸坡坡中产生沉降变形区显著。从岸坡中心线上自坡顶到坡脚取间距0.5 m的8个位移监测点(图1)绘制沉降变形量图(图13), 试验水位以下的浸泡土体竖向最大位移变形量到7.3 cm(第8个监测点在坡脚破坏区内, 不作考虑), 沉降变形量变化分成三段变化, 如监测点1~3坡段沉降变形逐步增大, 监测点3~5坡段则逐次减小, 监测点5~8段又逐次增大, 监测点3出现突变现象。由于在试验蓄水初期时, 在坡脚急速引发了大量裂缝和坍塌体, 故监测点8位移达

23.2 cm 的大变形,但监测点 8 不是沉降变形所致,是浸泡软化破坏引起的;此处产生坍塌体,使坡脚处临空,致使监测点 5~7 段依次增大;由于监测点 3 位于高水位附近,以下土体经库水浸泡软化作用产生沉降,与后缘坡体产生沉降差,形成张拉裂缝,随浸泡时间的增加,会加剧拉裂缝的形成,出现了明显的变形突增现象;监测点 3~5 段处于坡中区域,变形以沉降变形为主,无明显裂缝和坍塌体形成,故监测点 4 和监测点 5 小于监测点 3 和监测点 6 的沉降变形量。

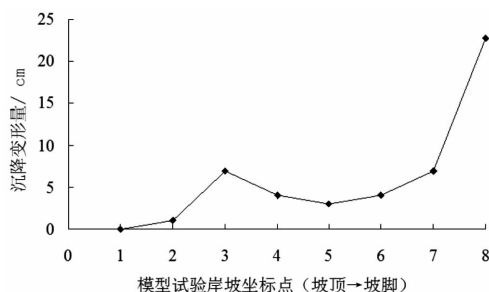


图 13 岸坡坡面监测点沉降变形量

(2)库水降落产生的动水压力,诱发坡体内产生丰富近于水平向的平行裂缝,部分转于近于平行的下凹坡脚的弧形裂缝。据图 6 知,由库水降落产生裂缝 11~18,近于平行的直线上,最上部裂缝为 17 与 18 呈现的近直线,中部裂缝 11~15 形成近直线,下部为裂缝 16 与 19 由直线转变为似下凹弧线。因库水降落时致岸坡内形成渗流压力拖曳类土质岩体向坡下运动,因渗流力与坡体走向垂直,产生大量的与坡体走向方向产生许多平行裂缝,但在坡脚同时受到剪应力迹线偏转的影响,致裂缝迹线的走向发生偏转,呈现下凹圆弧形。大量平行裂缝也为类土质岸坡坡脚持续发生渐进性破坏创造了先决条件。

2.3 第二次蓄水类土质岸坡地貌演化特征分析

据图 6 知,当试验库水位降落维持试验低水位 0 cm 的 22 h 后开始第再次蓄水,当蓄水试验水位上升为 32.6 cm 时,裂缝 13、14 相互连接贯通,裂缝 16 沿坡下方发展,产生新裂缝 19;当试验水位上升到 38.3 cm 时,19 号裂缝快速延展生成坍塌体 XI;试验水位持续上升到 39.5 cm 时,相互贯通的裂缝 13、14 沿坡体下方延展生成新的坍塌体 XII,其垮塌后生成的临空面进一步促进了裂缝 16 的扩展,致使 X III 坍塌体形成。通过 3D 激光扫描技术可见类土质岸坡的坡脚破坏很明显(图 14),整体横向裂纹已贯通,再次蓄水会在坡脚低水位位置使类土质岸坡再次浸泡软化,临空面处从右至左继续发生,使坍塌体加速出现,在坡脚低水位浸泡区域形成大面积垮塌区(图 15)。

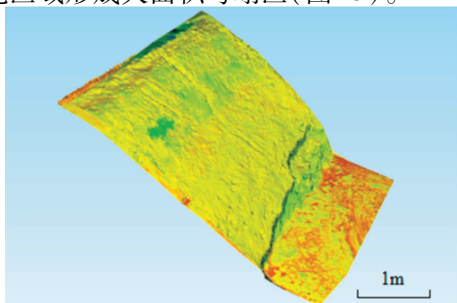


图 14 第二次蓄水岸坡破坏形迹(3D 激光技术)

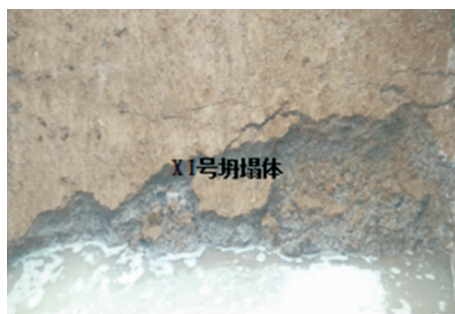


图 15 第二次蓄水岸坡坡脚坍塌体及大面积垮塌

再次循环蓄水使类土质岸坡的破坏会重新启动并加剧,裂缝会进一步扩展贯通,并大面积发生垮塌。受水位抬升浸泡再次影响,坡体强度参数会再次衰减,使已形成的裂缝扩展贯通,致坡脚产生坍塌体 XI、XII 及坍塌体 X III,运用软件 Cyclone9.0 中 TIN Volume 模块处理,获得再次蓄水的破坏总量为 0.65 m^3 ,该破坏量为初次蓄水坍塌总量的近 7 倍。因此,蓄水浸泡软化拉裂致类土质岸坡破坏的直接诱因,水库运行期的多循环的库水位升、降及浸泡导致岸坡坡脚渐进性破坏持续进行,随着后缘裂纹的进一步扩展,有可能形成整体性滑移。

3 结论

基于 3D 激光扫描技术,通过对库区运行期间类土质岸坡模型试验,对岸坡变形与破坏数据进行分析,得出以下类土质岸坡变形破坏及地貌精细化特征。

(1)蓄水浸泡致类土质岸坡破坏在短时间内完成,具有突发性特征;此类蓄水诱发类土质岸坡变形破坏发生在坡脚有限 30% 范围;试验蓄水浸泡引致类土质岸坡变形破坏为渐进性破坏模式;蓄水致类土质岸坡后缘形成显著的卸荷裂隙区。孔隙水压力曲线变化可分为相对稳定、波动以及稳定增长 3 个阶段,波动阶段表现为孔隙水压力降低且出现负孔隙水压力现象,此波动是库岸裂纹发育的直观表征。

(2)类土质岸坡坡脚由于受库水浸润软化作用导致形成岸坡沉降变形显著,特别是高水位线附近出现位移突变;库水位降落致坡内形成的渗流驱动力诱发坡体内产生大量平行裂缝,甚至部分呈现下凹坡脚弧线。孔隙水压力曲线变化分为缓慢降低、快速下降和负孔隙水压力三个阶段,负孔隙水压力阶段是岸坡裂纹快速贯通阶段。

(3)再次试验蓄水浸泡软化会再次诱发类土质岸坡坡脚低水位区域破坏会重新启动。岸坡坡脚低水位区域发生破坏主要缘于水库蓄水的升、降、浸泡且多次循环浸泡导致岸坡坡脚渐进性破坏、破坏持续进行,后缘裂纹扩展至深部,与横向裂纹贯通则极有可能导致岸坡发生整体性滑移。库水位升降致使库岸坡内水位具有明显滞后现象,土体浸泡软化是岸坡破坏的重要诱发因素,为后期研究类土质岸坡的变形破坏、库岸地貌演化及防治处置技术具有重要意义。

参考文献:

- [1] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1081-1093.
- [2] 常宏, 金维群, 王世昌, 等. 清江中下游岸坡稳定性对河流地貌过程的响应[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 756-763.
- [3] 陈洪凯, 唐红梅, 王林峰, 等. 缓倾角岩质陡坡后退演化的力学机制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 468-473.
- [4] 李景富, 常宏, 谭建民. 考虑河流地貌演化因素的清江隔河岩库区岸坡稳定性预测[J]. 华南地质与矿产, 2014, 30(2): 162-168.
- [5] 孟立朋, 彭轩明, 吴吉民, 等. 青干河软硬相间顺向岸坡演化过程研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 52-56.
- [6] 李晓鸿. 扰动条件下的库岸边坡非线性演化机理研究[J]. 淮阴工学院学报, 2012, 21(1): 50-52.
- [7] 何潇, 王建力, 陈洪凯, 等. 长江巫峡河谷地质灾害主要特征与演化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(10): 130-136.
- [8] 周云涛, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡库区龚家方 II 号类土质岸坡演化机制研究[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 97-99, 102.
- [9] 唐红梅, 周云涛, 沈娜, 等. 三峡库区类土质岸坡破坏机制研究[J]. 重庆师范大学学报, 2016, 33(4): 32-39.
- [10] 胡启军, 谢强, 郑立宁. 长大顺层边坡渐进滑移失稳演化机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 31-37.
- [11] 戴青松, 巨能攀, 郑达, 等. 基于离散元法的某滑坡变形演化机理浅析[J]. 人民长江, 2014, 45(15): 63-66.
- [12] 严珍珍, 范湘涛, 杜小平, 等. 山坡演化过程的有限元数值模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1832-1838.
- [13] 梁学战, 赵先涛, 向杰, 等. 库水位升降作用下土质岸坡变形特征实验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 92-100.
- [14] 刘强, 崔希民, 刘文龙, 等. 三维激光扫描技术在煤矸石山复垦中的应用[J]. 测绘工程, 2015, 24(10): 67-90.
- [15] 祝文婷. 三维激光扫描技术在深坑岩壁精细勘测中的应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2016, 8(4): 73-79.
- [16] 周云涛. 三峡水库运行期间类土质岸坡破坏机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

Analysis on Deformation and Failure Based on Test Model of Earthy-soil Bank Slope under Reservoir Water Level Fluctuation

TANG Hongmei¹, ZHOU Yuntao² and LI Junnan¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Institute of Exploration Technology CAGS, Chengdu 611734, China)

Abstract: The earthy-soil bank slope is widely distributed in Three Gorges Reservoir area. The deformation and failure evolution of earthy-soil bank slope is all the complex process because of water level fluctuation in the Three Gorges reservoir. and controlling is very difficulty. Based on the 3D laser scanning technique, the model test of earthy-soil bank slope simulates their deformation and failure during the operation of the Three Gorges reservoir. Many test data are obtained and analyzed the geomorphic evolution characteristics of the bank through the model test of the soil bank. It is embodied in several aspects: first, water storage and dip softening induced earthy-soil bank slope deformation and failure is happened very suddenly. The destruction process presents the progressive failure formality, and the slope failure occurs at the foot of slopes formed about the thirty percent of soak area near the low water level. The curves of pore-water pressure perform 3 stages: relatively stable stage, fluctuation stage and steady increasing stage. The fluctuation is visual representation of crack development of bank slope. Secondly, due to the effect of reservoir water dip softening, a large area of settlement deformation occurs in earthy-soil bank slope, displacement monitoring indicates that the shifting change suddenly near the high water level, then the unloading area is formed in trailing edge of earthy-soil bank slope; thirdly, the seepage flow driving force formed by the drawdown of reservoir water level causes a large number of parallel cracks in the slope, and it will deflect partly towards the foot of slopes. The curves changes of pore-water pressure perform 3 stages: slowly decreasing stage, rapidly decreasing stage and negative pore-water pressure stage. The negative pore-water pressure stage is the stage of rapid crack coalescence of bank slope; meanwhile, the second store water induced that the crack are able to scale horizontally, and exacerbated a large area of collapse occurred, with the further expansion of the crack, may lead to a whole slip. This provides important reference significance for research and controlling in future.

Key words: reservoir water level fluctuation; bank slope deformation; progressive failure; test; earthy-soil bank slope