

[文章编号] 1003-4684(2023)04-0117-06

库水下降与降雨作用下滑坡变形特征和破坏机理

朱勇威, 胡军安, 胡 鹏

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为探讨库区滑坡变形特征以及失稳破坏情况, 本文概化制作了白家包滑坡物理试验模型, 模拟水库蓄水作用, 以及水库蓄水和降雨共同作用的工况, 通过试验获得滑坡监测点的孔隙水压力、土压力以及滑坡位移。得到以下结论: 库水下降会诱发滑坡坡脚局部牵引式崩塌, 从而地下水补给库水使得孔隙水压力不断下降, 地下水位以上土体排水固结容重减小, 导致土压力值持续降低, 滑坡出现轻微蠕动; 库水下降与降雨联合作用下滑坡稳定性明显降低, 坡脚发生失稳破坏, 相对于滑坡而言, 整体发生牵引式崩塌的风险更大。试验揭示了在库水下降与降雨共同作用下滑坡变形的破坏机理, 为此类滑坡的研究提供参考。

[关键词] 库水下降; 降雨作用; 变形破坏机理; 失稳破坏

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

三峡库区存在多处水库蓄水运营后产生的安全隐患, 库岸滑坡变形破坏影响着库区旁边人民正常生产生活。研究滑坡在水位变化作用下的特征机理及变形机制对库岸滑坡危害的防治具有重大意义^[1-3]。陈剑^[4]根据现场监测数据, 利用力学极限平衡分析及数值模拟的方法进行结果分析, 研究表明, 适当减小库水位升降速率, 对维持库水区滑坡稳定性有重要的作用, 但还有其他因素影响库区滑坡; 代贞伟^[5-6]通过数学算法模拟了库水作用下滑坡位移的破坏模式; 陈晓平等^[7-9]通过模拟物理滑坡试验得出, 坡脚抗滑阻力下降是库区滑坡在水库运行后发生变形的主要原因; 杜锋、胡修文等^[10-12]通过模拟试验发现, 在地下水、暴雨及库水位快速下降三者共同作用下会导致库水区滑坡发生失稳破坏; 刘新喜、贾官伟等^[13-14]结合三峡库区调控方案, 利用有限元方法模拟了库水位在 175 m 下降至 145 m 时以及极端降雨作用下, 库区滑坡暂态渗流场, 并考虑了基质吸力对非饱和土物理抗剪强度的影响; 卢书强等^[15]通过现场地质勘查来确定现场滑坡的形态性质, 对滑坡变形发展进行了评估。

现有研究考虑单一因素对库岸滑坡影响的研究较多, 而对多种因素共同作用下滑坡的变形破坏研究较少。本文基于实际滑坡地质结构原型, 通过物理模型试验, 模拟不同工况下滑坡的变形及破坏过程, 通过滑坡监测面的孔隙水压力、土压力以及位移等实时数据来揭示库水下降以及降雨作用下的滑坡

变形特征与破坏机理。

1 滑坡实验和模型设计

1.1 滑坡基本概况

白家包滑坡位于秭归县归州镇向家店村, 距香溪河入江口 2.5 km。大地坐标: 经度 $110^{\circ}45'33.4''$, 纬度 $30^{\circ}58'59.9''$ 。滑坡区发育两山脊之间, 为一凹形地貌, 滑体内发育一冲沟, 为滑坡区地表水排水通道。区内西高东低, 西部坡角较大, $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 东部稍缓, 坡角 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。滑坡剪出口位于高程 125~135 m, 滑坡后缘以基岩为界, 高程 265 m, 右侧以山梁为界, 左侧以山脊下部基岩为界, 前缘宽 500 m, 后缘宽 300 m, 均宽 400 m, 纵长约 550 m, 滑坡面积 $22\times 10^4\text{ m}^2$ 。滑坡坡面坡度 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$, 滑体前缘临江段坡度 20° , 中部平缓, 坡度 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$, 滑坡平均坡度约 15° 。深层滑体前缘厚 20~30 m, 后缘厚 10~40 m, 中部厚 47 m, 滑体平均厚度 45 m, 滑体体积 $990\times 10^4\text{ m}^3$ 。浅层滑体前缘厚 10~20 m, 中部厚 35 m, 后缘厚 10~40 m, 滑体平均厚度 30 m, 滑体体积 $660\times 10^4\text{ m}^3$ (图 1)。

从白家包滑坡地质勘查成果可以看出, A-A' 剖面的方向代表白家包滑坡整体运动方向, 因而选取 A-A' 剖面作为白家包滑坡物理模型试验的代表剖面进行模型试验研究。A-A' 的地质剖面如图 2 所示。对试验剖面地质结构进行概化, 就是将复杂的地质结构概化为几个特征的材料分区进行试验模

[收稿日期] 2021-12-24

[基金项目] 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC0005)

[第一作者] 朱勇威(1994—), 男, 湖北黄石人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为土木与水利工程。

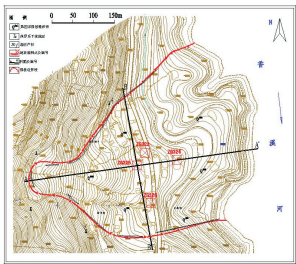


图1 白家包滑坡平面及监测点位置

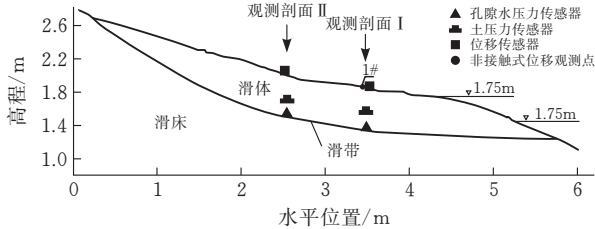
拟,对 A-A'剖面材料分成三个区,分别是滑床、滑带和滑体。滑坡原型 A-A'剖面滑坡全长 550 m,模型试验平台长 8 m,模型试验最大几何相似比为 $8/550=1/68.75$,考虑到模型中对水库水位的模拟,最后

表1 滑坡模型物理力学参数

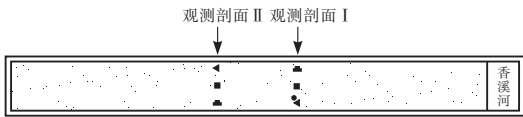
材料名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)		黏聚力 C/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		弹性模量 E/MPa		泊松比 ν	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型	原型	模型
滑体	26.4	24.9	27	0.25	30	28	1960	18.80	0.38	0.41
滑带	23.5	22.4	14	0.14	15.8	14.9	27	25.21	0.36	0.34

1.3 试验工况

试验仅考虑大气降雨和水库蓄水对白家包滑坡变形破坏的影响。大气降雨的影响概化为降雨过程(降雨强度和降雨历时)的变化对坡面入渗和产流边界的影响;水库蓄水的影响概化为水库水位变化对滑坡前缘水位边界条件的影响。为了分析在水库蓄水及降雨条件下,白家包滑坡位移场的变化情况,本试验将位移传感器、土压力传感器和孔隙水压力传感器布置于 I 和 II 的剖面处,用于监测试验模型实时数据(图 3)。



(a)滑坡模型侧视图



(b)滑坡模型俯视图

图3 白家包滑坡试验模型

根据滑坡原型的气象、水文资料^[17]对降雨量进行简化,忽略日降雨量在 10 mm 以下的降雨历程,日平均降雨量 29.1 mm,最小降雨 15.5 mm,最大降雨量 51.7 mm,降雨过程为 14 d。175 m 降 145 m 水位按照最大 2 m/d 的水位下降速度进行,水位下降时长约为 15 d,如表 2、3、图 4 所示。

确定模型试验几何相似比为 1 : 100。

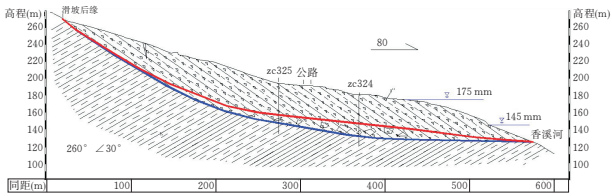


图2 白家包滑坡 A-A'地质剖面

1.2 材料参数确定

已知几何相似比,根据相似原理^[16],黏聚力、弹性模量相似比为 10;降雨强度、时间相似比为 10;重度、内摩擦角、泊松比相似比为 100。滑坡试验模型材料的物理参数,如表 1 所示。

表2 水位控制过程(175~145 m)

实际工况		模型工况	
时间/d	水位/m	时间/h	水位/m
0	175	0.00	1.75
1	175	2.40	1.75
16	145	38.40	1.45
17	145	40.80	1.45

表3 降雨控制过程(175~145 m)

实际工况		模型工况	
时间/d	降雨量/mm	时间/h	降雨量/mm
1.5	27.6	3.60	2.76
2.5	20.4	6.00	2.04
3.5	21	8.40	2.10
4.5	29.5	10.80	2.95
5.5	37.9	13.20	3.79
6.5	15.5	15.60	1.55
7.5	51.7	18.00	5.17
8.5	36.2	20.40	3.62
9.5	28.1	22.80	2.81
10.5	20.6	25.20	2.06
11.5	30.9	27.60	3.09
12.5	23.5	30.00	2.35
13.5	40.2	32.40	4.02
14.5	21.3	34.80	2.13

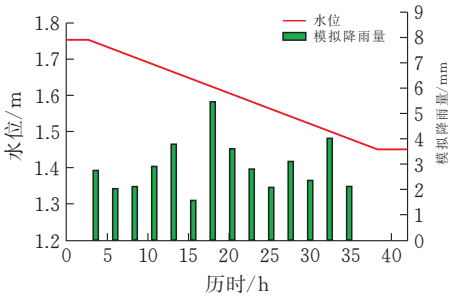


图4 降雨及库水位模拟工况(175~145 m)

2 滑坡试验结果分析

在水库蓄水作用,以及水库蓄水和降雨的联合作用下,对滑坡的孔隙水压力、土压力和位移变化情况进行分析。通过两个阶段进行,第一阶段(三种工况下):工况 1,175 m 水位不变。工况 2,175 m 水位下降至 145 m。工况 3,175 m 水位降至 145 m 及暴雨作用;第二阶段:为探讨滑坡破坏模式,在工况 3 基础上,再次施加 175 m 水位降至 145 m 及暴雨作用,持续 40 h,并逐步增加模型平台的倾斜角直至 8° 滑坡发生失稳。

2.1 第一阶段

1)工况 1(175 m 水位不变) 如图 5、6、7 所示,在 1.75 m 水位的情况下,两个观测面的孔隙水压力、土压力以及位移基本保持在一个均值,在水位值稳定之后,此时可观察到滑坡内部的浸润线逐渐稳定不变,且浸润线时与水面平行的一条直线,滑坡模型无明显变化。

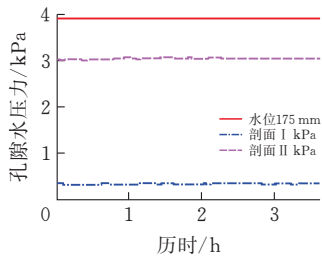


图 5 孔隙水压力变化曲线

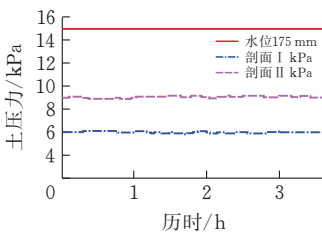


图 6 土压力变化曲线

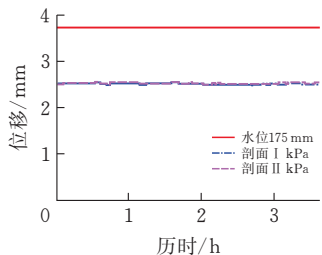


图 7 位移变化曲线

2)工况 2(175 m 水位下降至 145 m) 如图 8 所示,保持库水位 1.75 m 约 3.6 h,再以 0.83 cm/h 的水位下降速度控制水位下降到 1.45 m 并且使库水位保持在 1.45 m 处,在水位下降的过程中,剖面 I 在 2.4 h 时刻孔隙水压力开始减小,直到 38.4 h 时刻时孔隙水压力趋于 0,而剖面 II 在 2.4 时刻孔隙

水压力也逐渐减小,直到 6.1 h 时刻趋于 0。分析可知,滑坡前缘部分在保持 1.75 m 水位时孔隙水压力值几乎保持不变,之后库水位下降导致地下水补给库水,因此出现了孔隙水压力减小的趋势。滑坡中部、后缘距离水库相对较远,由于库水位下降,导致原有地下水向前缘运移推进,因此中部、后缘孔隙水压力也在减小。

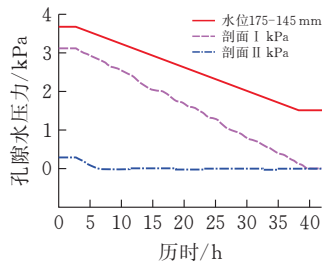


图 8 孔隙水压力变化曲线

如图 9,剖面 I 的土压力从 2.4 h 时刻开始减小,一直减小到 6 kPa,剖面 II 的土压力有小幅波动,但总体上无明显变化。如图 10,中部位移、滑坡体后缘未变化,在此过程中,当水库水位下降至 1.47 m(即在第 36 h 时刻)时前缘位移发生突变。分析可知,前缘地下水位下降,使得地下水位以上土体排水固结容重减小,从而导致土压力值持续降低,局部裂缝逐步扩大并贯通,模型边坡坡脚发生了局部破坏。

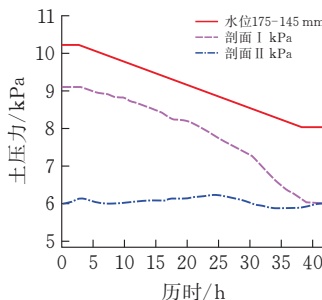


图 9 土压力变化曲线

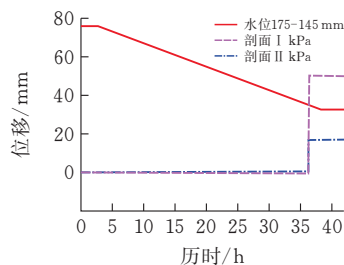


图 10 位移变化曲线

3) 工况 3 (175 m 水位降至 145 m 及暴雨作用) 由图 11、12 可知,在施加暴雨的情况下,水位从 1.75 m 下降至 1.45 m 的过程中,观测面 I 和 II 的孔隙水压力以及土压力总体上在减小,且两者均呈波浪型变化,其中 2 个观测点的孔隙水压力在 40.8 h 时刻趋于 0 值,而观测点 1 土压力从 9.14 kPa 减小

到 6.04 kPa,观测点 2 土压力仍保持原值。从图 13 还可知,大约第 18 h 时刻发生突变产生位移,此时滑坡前缘和滑坡中部的裂缝数量增加且裂缝逐渐贯通并扩张得更大,甚至模型边坡坡脚发生局部垮塌,滑坡中部的滑体局部发生轻微蠕动变形,但试验并未发生整体变形破坏。分析可知,坡内地下水外渗形成动水压力且地下水的软化作用降低了前缘稳定性,加上雨水的冲刷作用共同导致了滑坡前缘垮塌及中部的变形。

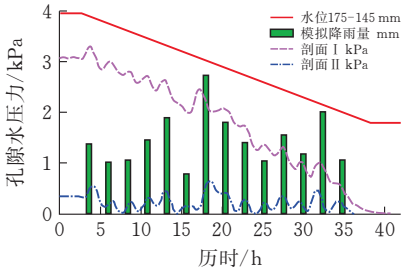


图 11 孔隙水压力变化曲线

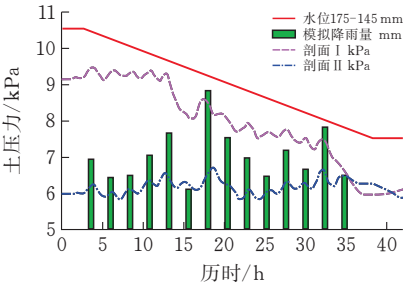


图 12 土压力变化曲线

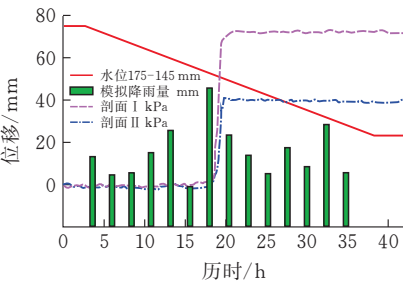


图 13 位移变化曲线

2.2 第二阶段:(破坏阶段)

如图 14—16,滑坡体内孔隙水压力值、土压力值以及位移值均发生突变。其中孔隙水压力值在第 25.2 h 时增大明显,持续约 1 h 后消散,土压力值第 22.8 h 时刻出现一次极值,急剧下降后消散,位移值在第 24 h 时刻急剧增大,随后也开始消散。此时,滑坡直接发生整体破坏,土体已处于较高饱水状态,随着降雨持续,滑坡体内细微变形逐渐累积,两个检测点的孔隙水压力急剧增大,直到滑坡开始滑动,孔隙水压力消散,土压力持续下降,这是因为该滑坡模型在向前滑动对前一阶段滑坡后缘形成加载。

2.3 变形机制及破坏机理讨论

如图 17,在库水位骤降作用下,滑坡前缘及中

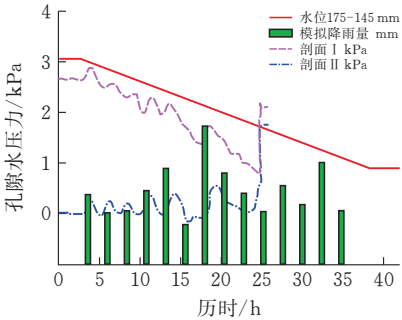


图 14 孔隙水压力变化曲线

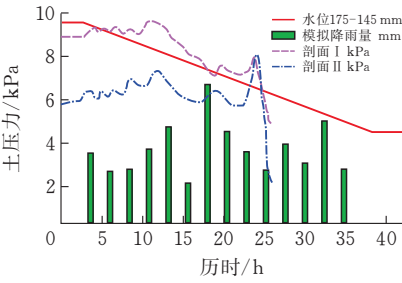


图 15 土压力变化曲线

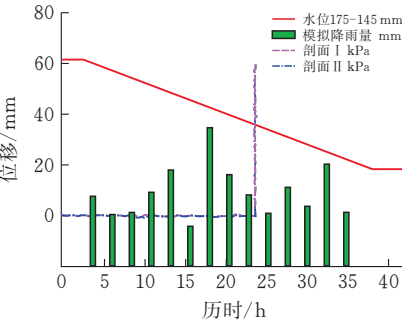


图 16 位移变化曲线

部出现了局部变形,整体未出现显著变形;而在库水位骤降和暴雨共同作用下,滑坡后缘首先出现显著变形,随后在库水位骤降以及后缘下滑推动下,前缘产生较大位移滑动。后缘总体滑动位移 412 mm,前缘总体滑动位移 609 mm。前缘滑动过程中脱离,后缘下滑后停留在滑动面上可以保持稳定的部分占滑坡剖面的 1/3 至 1/2,前缘滑动速度较后缘滑动速度大。

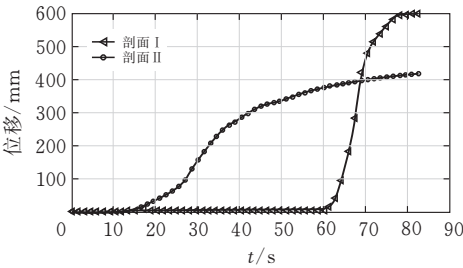


图 17 滑坡模型破坏过程中位移计采集位移

白家包滑坡的滑坡体受 175 m 库水位浸润的体积大概占滑坡总体积的 1/2 至 2/3,滑坡稳定性受水

库水位变动的的作用显著。我们可以看到滑坡滑动面的特点是前缘平缓,后缘陡峭。且由于白家包滑坡前缘阻滑区体积庞大,滑坡失稳下滑的滑距有限,滑速较低,不具备形成高速滑坡的动力条件。

在暴雨维持一段时间后,滑坡整体在长时间降雨浸泡后出现软化、微小变形并不断累积。前一个阶段滑坡蠕动变形降低了该阶段的前缘稳定性,该阶段雨中夹杂的微粒聚集起来堵塞了消散通道致使滑坡透水性能降低,最终在雨水积蓄产生的水平力作用下,滑坡发生了失稳破坏。由此可得出土压力及空隙水压力的骤变,对滑坡发生失稳破坏具有预测意义。

3 结论

1)降雨作用使得雨水在滑坡坡面发生了充分的渗入,从而导致了滑坡整体强度削弱,再次降雨时极容易引起滑坡发生失稳破坏。

2)在滑坡模型最终的破坏过程中,后缘的下滑动力主要是其陡峭的后缘滑移面提供的下滑力,因此滑坡后缘启动与前缘变形并不存在直接的牵引关系。

3)靠近坝库处的位置易产生蠕动,库水位与暴雨共同作用下的滑坡属于浅层牵引式滑坡。滑坡发生整体沿基岩面滑移破坏的可能性不大。

4)强降雨对第一阶段后期以及第二阶段的滑坡稳定性有明显影响,坡内雨水的外渗、雨水的冲刷产生水平力及水的软化作用导致坡脚失稳。坡型的陡峭程度、降雨作用下的自重增加以及地下水、雨水作用下的浸水软化是造成滑坡相对于整体沿着滑面产生较为明显蠕动的的主要原因。

[参 考 文 献]

[1] 黄达,匡希彬,罗世林.三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究[J].水文地质工程地质,2019,46(05):

127-135.
[2] 孙萍,王刚,李荣建,等.降雨条件下黄土边坡现场试验研究[J].工程地质学报,2019,27(02):466-476.
[3] 李卓,何勇军,李宏恩,等.前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(05):400-405.
[4] 陈剑,李晓,杨志法.三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J].工程地质学报,2005(03):305-309.
[5] 代贞伟.三峡库区藕塘特大滑坡变形失稳机理研究[D].西安:长安大学,2016.
[6] 代贞伟,殷跃平,魏云杰,等.三峡库区藕塘滑坡变形失稳机制研究[J].工程地质学报,2016,24(01):44-55.
[7] 陈晓平,黄井武,吴宏伟,等.库岸古滑坡离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(10):1496-1503.
[8] 周跃峰,龚壁卫,胡波,等.牵引式滑坡演化模式研究[J].岩土工程学报,2014,36(10):1855-1862.
[9] 李卓,何勇军,盛金保,等.降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(03):452-459.
[10] 杜锋,许模,肖先煊,等.顺层缓倾型水库滑坡稳定性物理模拟试验研究——以向家坪滑坡为例[J].工程地质学报,2018,26(03):694-702.
[11] 胡修文,唐辉明,刘佑荣.三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(12):2089-2095.
[12] 常晓军,王德伟,唐业旗.中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势[J].沉积与特提斯地质,2010,30(01):98-102.
[13] 刘新喜,夏元友,张显书,等.库水位下降对滑坡稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,2005(08):1439-1444.
[14] 贾官伟,詹良通,陈云敏.水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(09):1798-1803.
[15] 卢书强,易庆林,易武,等.三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J].岩土力学,2014,35(04):1123-1130.
[16] 肖捷夫,李云安,胡勇,等.库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J].岩土力学,2021,42(02):471-480.
[17] 刘伊凡.三峡库区白家包滑坡变形机制及预测预报研究[D].宜昌:三峡大学,2019.

Exploration on the Deformation Characteristics and Damage Mechanism of Landslide Under the Action of Reservoir Water Decline and Rainfall

ZHU Yongwei, HU Jun'an, HU Peng

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)
Abstract: In order to explore the deformation characteristics and destabilization damage of the reservoir landslide, this paper generalizes the physical test model of Baijiabao landslide to simulate the reservoir storage effect and working conditions of the combined effect of reservoir storage and rainfall, and obtains the pore water pressure, soil pressure and landslide displacement of the landslide monitoring point through the test. The following conclusions are obtained: the decline of reservoir water will induce local traction collapse at the foot of the landslide, thus the pore water pressure decreases continuously due to groundwa-

ter recharge, and the soil drainage consolidation capacity above the water table decreases, resulting in a continuous decrease of soil pressure and slight creep of the landslide; the stability of the landslide decreases significantly under the combined effect of reservoir water decline and rainfall, and instability damage occurs at the foot of the slope, compared with the landslide, the overall risk of traction collapse is greater. The risk of overall traction landslide is greater than that of landslide. The test reveals the damage mechanism of landslide deformation under the combined effect of reservoir water fall and rainfall, and provides a reference for the study of such landslides.

Keywords: reservoir water fall; rainfall; deformation damage mechanism; instability damage
[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 91 页)

Research on Deformation Characteristics of Expansive Soil and Constitutive Relationship based on Mohr-Coulomb Criterion

NIE Quchen, ZHUANG Xinshan, ZHOU Rong, WEN Wu

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Expansive soil is a kind of plastic special clay with higher strength. Its deformation characteristics are mechanically manifested as the cross action of spherical stress and deviatoric stress, and its hardening law should follow the law of non-associated plastic flow. In this paper, through the confined compression test and the consolidation drainage test, the shear shrinkage, compressibility and the coupling relationship of the expansive soil are described, and the Mohr-Coulomb yield condition is adopted, and the yield function formula and the plastic potential function formula are assumed. The same, except that the internal friction angle is replaced by the dilatancy angle, thereby derives the elastoplastic constitutive relationship of expansive soils. The study shows that the Mohr-Coulomb constitutive model is highly suitable for normally consolidated expansive soils and can be described more accurately Deformation characteristics and constitutive relationship of expansive soil.

Keywords: expansive soil; deformation characteristics; coupling; dilatancy angle; constitutive relationship
[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 110 页)

Impact Life Analysis of Polypropylene Fiber Cement Mortar Based on a Two-parameter Weibull Distribution Probability Model

XU Ziling, JIANG Jiuhong, WANG Yunfei, LIU Zeli

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: To enhance the impact resistance of the cement mortar, polypropylene fibers of different contents (0.3%, 0.35% and 0.4%) and diameters (20 μ m, 30 μ m and 48 μ m) were blended into the cement mortar. The impact resistance of cement mortar was comprehensively analyzed and evaluated by counting the number of impacts at the initial and final cracking of cement mortar through the drop hammer impact test. The test results showed that the impact resistance of cement mortar was proportional to the amount of polypropylene fibers dosed and did not show a good correlation with the diameter of polypropylene fibers. Based on the experimental data, the impact life of cement mortar was predicted by two-parameter Weibull distribution for different failure probabilities, and the damage evolution model of the corresponding cement mortar was established. The results show that the average error between the predicted values derived using the two-parameter Weibull distribution and the experimental data is only 4.21% at the highest, indicating that the prediction accuracy of the two-parameter Weibull distribution is high, which provides an important reference value and theoretical basis for the durability evaluation and life prediction of polypropylene fibers in practical engineering.

Keywords: cement mortar; polypropylene fiber; impact resistance; two-parameter Weibull distribution
[责任编辑: 裴 琴]