

降雨特性对滑坡孔隙水压力影响的试验研究*

陈洪凯, 周晓涵, 谭 玲

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:【目的】降雨条件是中国诱发滑坡灾害的根本原因,探讨滑坡体内孔隙水压力对降雨特性的响应关系是揭示滑坡成灾机制的关键环节。【方法】递增型降雨和中峰型降雨是重庆境内诱发滑坡灾害的主要降雨型式,据此采用模型试验方法分析滑坡体内孔隙水压力对降雨特性的响应问题。通过模型试验,得到了滑坡体内孔隙水压力随降雨历时的系列变化曲线。【结果】降雨作用下滑坡体内孔隙水压力的变化过程可分成缓变阶段、激增阶段和稳定阶段,且仅在激增阶段后期和稳定阶段时滑坡体才达到饱和状态;递增型降雨条件下各测点记录的孔隙水压力峰值点线斜率小于中峰型降雨条件下孔隙水压力峰值点线斜率,表明中峰型降雨更易使滑坡体达到饱和状态;滑坡表面的裂缝可显著影响降雨入渗特性,裂缝以下部分滑坡体更易发生变形和破坏;运用非饱和土力学理论对试验结果进行了科学解释。【结论】研究成果对于进一步研究降雨对滑坡稳定性的量化作用有积极意义。

关键词:土质滑坡;孔隙水压力;降雨特性;模型试验

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2017)01-0049-06

中国是滑坡灾害高发区,尤其是近10年来由于极端强降雨天气频率高,滑坡灾害进入高发期。目前,国内外广大学者对降雨诱发滑坡的研究主要集中在数值模拟、统计分析和室内物理模型试验3个方面,如林鸿洲等人认为高强度降雨较易使边坡产生流滑破坏,而低雨强长历时的降雨较易使边坡深层土体的孔隙水压力增加^[1];陈剑等人探讨了三峡库区降雨型滑坡的发生时间与降水条件的关系,发现最大24 h雨强可作为降雨诱发滑坡的有效预报因子^[2];张珍等人认为滑坡的活动强度与降雨量大小成正比,滑坡基本发生在降雨之后的4 d内^[3];尹洪江等人通过实施室内模型试验发现在低降雨强度下以坡面侵蚀为主,在强降雨作用下易形成阵性泥石流^[4];杨宏等人采用数值模拟方法分析了某露天排土场边坡的破坏问题,发现随着降雨量增加,边坡塑性破坏区不断增大并逐渐形成滑移破坏面^[5];郑重等人通过统计学分析,发现边坡位移和降雨量之间存在幂函数关系^[6];刘汉东等人认为在降雨强度恒定情况下,随着降雨的持续,边坡稳定系数减小,但降雨停止后又逐渐恢复到原来的状态^[7];冯汉中等人认为滑坡的发生受降水累计和滞后效应影响^[8];张国超等人采用GeoStudio中的SLOPE/W和SEEP/W模块对四川宝兴县硃砂乡泽根一社H2滑坡在80 d内3次降雨的影响下的稳定性进行评价,得出间歇性降雨对滑坡稳定性的影响规律^[9];崔云等人认为强降雨控制滑坡发育,集中表现在改变土体的静水压力、动水压力与浮托力的作用3个方面^[10];李德心等人研究了前期降雨、边坡体地下水位和渗流时间的关系^[11];莫运松等人研究了广西东巴凤二级公路滑坡的形成与降雨量、降雨方式以及降雨与滑坡产生的时间之间的关系^[12];李长江等人认为降雨引发滑坡的频度与降雨量之间遵循分形幂指数关系^[13];陈洪凯等探讨了降雨型滑坡降雨阈值统计特征^[14],通过实验揭示了重庆地区强风化泥岩的降雨入渗规律^[15],提出了重庆地区降雨型滑坡-降雨入渗耦合预报模型^[16]。可见,降雨是土质滑坡变形破坏的关键出发因子,其中核心环节是降雨作用下滑坡体内孔隙水压力的响应问题。本研究通过室内土质滑坡降雨模型试验,分析土质滑坡内孔隙水压力对降雨特性的响应关系,研究成果对于进一步研究降雨对滑坡稳定性的量化作用有积极意义。

1 降雨特性对土质滑坡破坏影响的模型试验

参照三峡库区云阳县何家湾滑坡,建造土质滑坡试验模型(图1),滑坡滑动面为基岩面,其坡角为37°,滑坡土体平均厚度为0.4 m,物性参数见表1。

* 收稿日期:2015-11-09 修回日期:2016-11-25 网络出版时间:2017-01-12 11:29

资助项目:国家科技攻关项目(No. GYHY201006039);重庆市自然科学基金重点项目(No. 2013JJB0005);2013年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. KJTD201305);重庆市“两江学者”计划专项经费资助(No. 201309)

第一作者简介:陈洪凯,男,博士,教授,研究方向为地貌过程减灾与环境修复,E-mail: chkcxf@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20170112.1129.002.html>

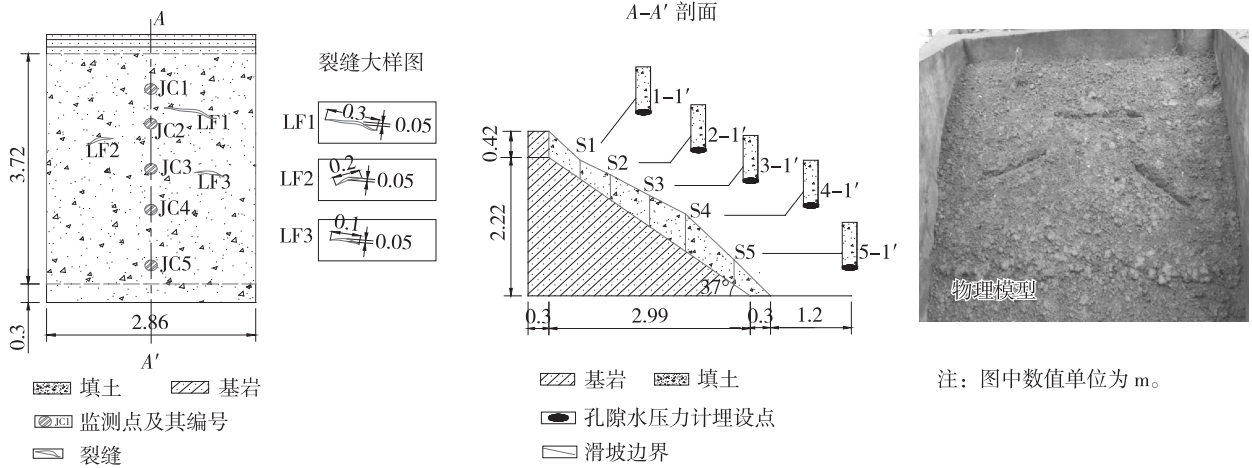


图 1 土质滑坡试验模型
Fig. 1 Experimental model for earth landslide

根据对重庆 1981—2010 年的降雨资料分析,重庆境内降雨雨型可分为中峰型、递增型、递减型、平均型等 4 种(图 2)。结合已发生的 251 个滑坡资料,发现 65.5 % 滑坡由递增型降雨引发,22.5 % 由中峰型降雨引发^[16]。为了探讨降雨历时和降雨强度对滑坡破坏的影响,以重庆境内降雨诱发滑坡的统计资料为参考,本试验设计了 4 种试验工况(表 2),包括两种降雨方案:1) 每个时段降雨历时 0.5 h,两次降雨之间的间隔时间取 0.5 h;2) 降雨历时和间隔时间均为 0.25 h。采用自行研发的自动控制降雨装置^[17],该装置能模拟不同降雨强度及降雨历时。在滑坡土体底部安放 5 个 YJ-32 型高精度振弦式孔隙水压力计,分别标注 S1、S2、S3、S4 和 S5(图 1),并用 SL-406 正弦式多功能读数仪进行读数量测。

模型试验过程中,连续采集土体内各个孔隙水压力计读数,累计有 7 万余个,孔隙水压力随降雨历时的变化特性如图 3 所示。

表 1 模型试验土体物性参数

Tab. 1 Physical parameters of soil for experiment

天然重度/(kN · m ⁻³)	饱和重度/(kN · m ⁻³)	天然含水量	孔隙比	渗透系数/(cm · s ⁻¹)
17.12	19.32	0.16	0.52	2.21 × 10 ⁻⁴

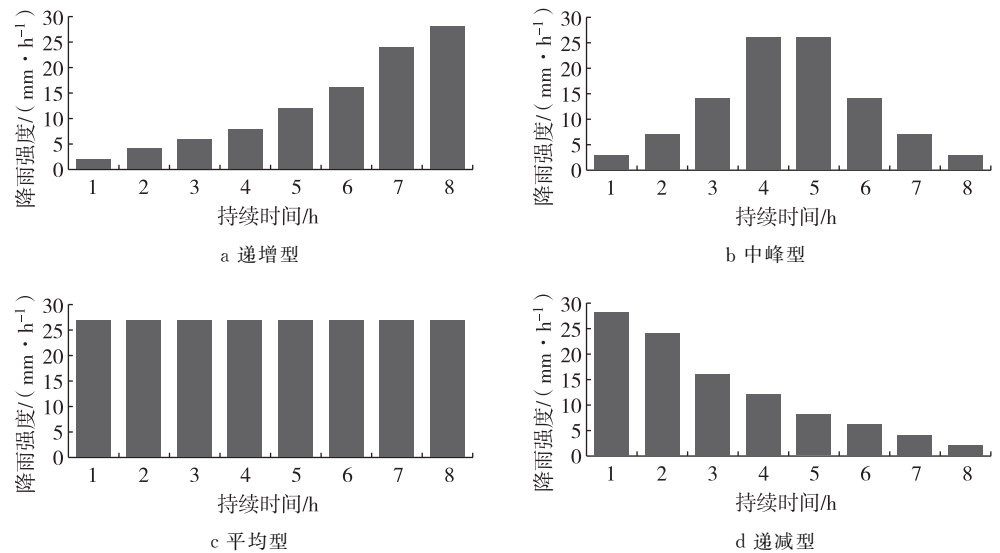


图 2 重庆境内降雨形式

Fig. 2 Rainfall patterns in Chongqing area

表 2 模型试验降雨方案

Tab. 2 Rainfall cases in experiment

试验工况	雨型	降雨历时/h	最小降雨强度/(mm · h ⁻¹)	最大降雨强度/(mm · h ⁻¹)	降雨总量/mm
S-1	递增型	8	2	28	100
S-2	递增型	4	4	56	100
S-3	中峰型	8	3	26	100
S-4	中峰型	4	6	52	100

2 试验结果分析

从图 3 可看出,实验条件下土质滑坡内孔隙水压力对降雨特性的响应特征明显,孔隙水压力变化曲线呈现 3 个阶段,即缓变阶段、激增阶段和稳定阶段,具有如下特征:

1) 在降雨历时相同时,递增型降雨条件下沿坡向下不同测点记录的孔隙水压力缓变阶段历时基本相同。例如,S-1 工况均在 112 min 左右,S-2 工况均在 63 min 左右。但是在中峰型降雨条件下,滑坡体内不同测点记录的孔隙水压力缓变阶段历时存在较大差异。例如,S-3 工况 1#测点的孔隙水压力缓变阶段历时约 160 min,5#测点的孔隙水压力缓变阶段历时则只有 60 min 左右。由于降雨历时较长时,孔隙水压力曲线的缓变阶段历时也较长,如 S-3 工况 1#测点记录的孔隙水压力缓变阶段历时约 160 min,而 S-4 工况 1#测点记录的孔隙水压力缓变阶段历时仅约 27 min,即降雨历时为 8 h 的缓变阶段历时(S-3 工况)为降雨历时为 4 h 的缓变阶段历时(S-4 工况)的 6 倍左右。

2) 从每个测点记录的孔隙水压力峰值点连线表达的峰值点线斜率可明显表征雨型对孔隙水压力激增阶段的影响,即递增型降雨条件下孔隙水压力峰值点线斜率小于中峰型降雨条件下孔隙水压力峰值点线斜率。例如,S-1 工况为 2.75,S-3 工况则可高达 7.12。同时,降雨历时对孔隙水压力峰值点斜率影响不大,如递增型降雨条件下 S-1 工况和 S-2 工况的孔隙水压力峰值点线斜率均在 2.75 左右,而中峰型降雨条件下 S-3 工况时为 7.12,S-4 工况时为 5.67。

3) 在递增型降雨和中峰型降雨条件下,滑坡体内各测点记录的孔隙水压力曲线稳定阶段历时都较长。例如 S-1 工况和 S-3 工况 1#测点孔隙水压力稳定阶段均为 330 min 左右,约占降雨总历时的 70%。同时,中峰型降雨条件下沿坡向下不同测点记录的孔隙水压力稳定阶段历时的差

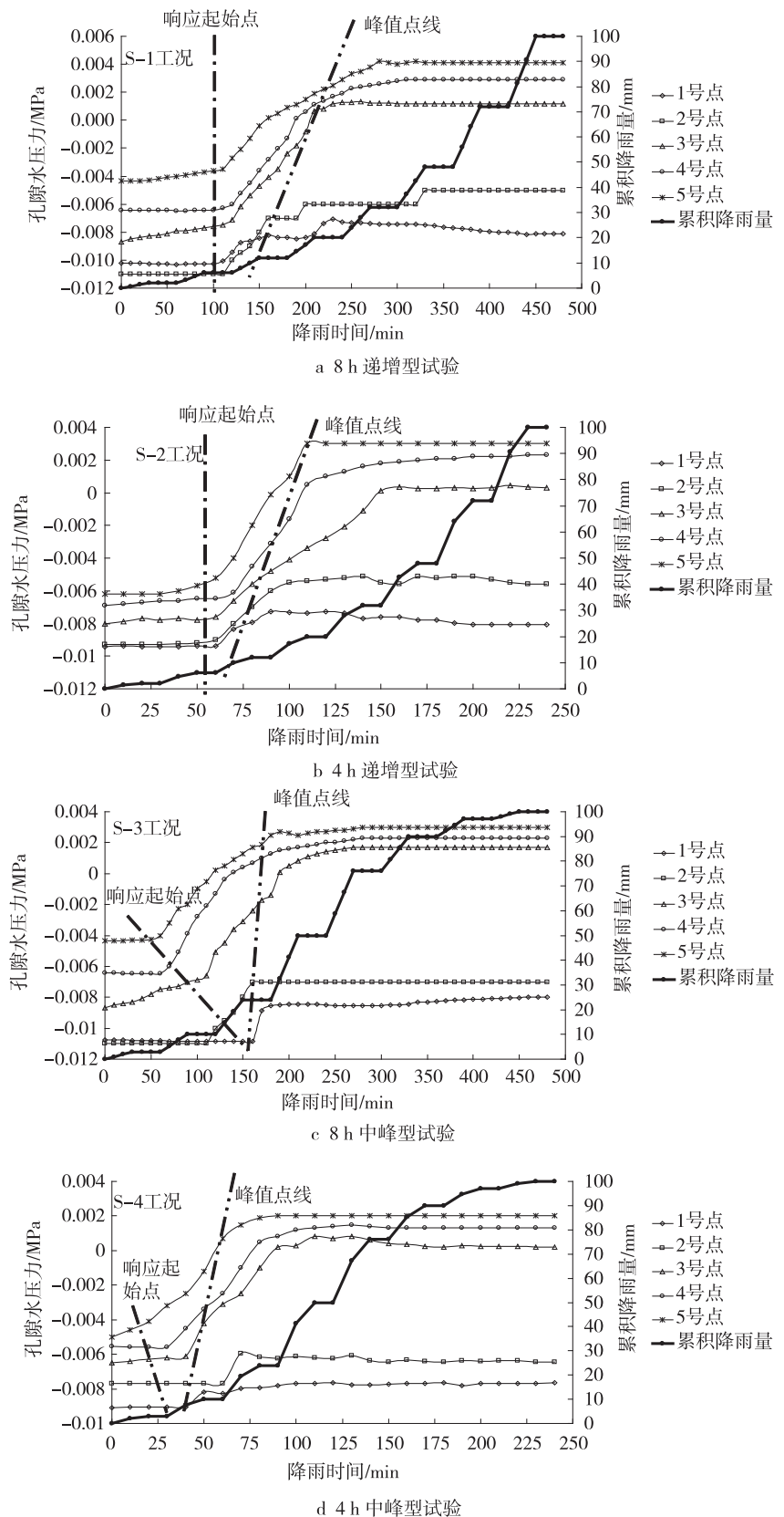


图 3 滑坡体内孔隙水压力随降雨历时的变化曲线

Fig. 3 Pore water pressure vs. rainfall duration curves in experiment

左右,约占降雨总历时的 70%。同时,中峰型降雨条件下沿坡向下不同测点记录的孔隙水压力稳定阶段历时的差

异明显小于递增型降雨条件下的差异。例如, S-3 工况 1# 测点记录的孔隙水压力稳定阶段历时约 330 min, 5# 测点记录的孔隙水压力稳定阶段历时约为 320 min, 二者相差 3% 左右, 而 S-1 工况 1# 测点和 5# 测点记录的孔隙水压力稳定阶段历时相差可及 30% 左右。

4) 孔隙水压力曲线缓变阶段记录的孔隙水压力均为负值, 3#、4# 和 5# 测点激增阶段的早起和中期的孔隙水压力也为负值, 而激增阶段晚期和稳定阶段记录的孔隙水压力均为正值, 1# 测点和 2# 测点记录的孔隙水压力全程均为负值。在降雨历时相同时, 递增型降雨条件下滑坡体内孔隙水压力大于中峰型降雨条件下的孔隙水压力, 如 S-1 工况 5# 测点稳定阶段的孔隙水压力约为 4 kPa, S-3 工况时则为 3 kPa 左右。

3 讨论

3.1 降雨入渗期间滑坡体属于非饱和土体

试验初期, 孔隙水压力传感器所在部位即滑坡体底部滑动面处于干燥状态, 随着降雨时间增长, 孔隙水压力传感器出现读数, 且为负值, 这表明降雨入渗期间滑坡体为非饱和土体。负的孔隙水压力体现了非饱和土体中基质吸力的影响。土体处于非饱和状态时, 颗粒间的水-气界面属于向颗粒间内凸的弯液面, 如图 4 中的曲面 1, 而弯液面的存在必然出现基质吸力^[18]。基质吸力的理论表达式如下:

$$s = u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \quad (1)$$

式中, s 为基质吸力(单位: kPa), u_a 为孔隙气压力(单位: kPa), u_w 为孔隙水压力(单位: kPa), T_s 为弯液面表面张力(单位: kPa), R_s 为弯液面曲率半径(单位: m)。

由(1)式可见, 弯液面曲率半径越小, 图中基质吸力越大, 当弯液面曲率半径越大时, 基质吸力越小, 尤其是弯液面成为平面后, 如图 4 中水-气界面 2 时, 即 $R_s \rightarrow \infty$, 则基质吸力趋于 0。这表明, 土质滑坡在降雨入渗初期, 水体主要沿着颗粒间向土体内部渗透, 土体颗粒之间存在水-气弯液面, 所量测的孔隙水压力为负值。在滑坡底部土颗粒之间的水-气弯液面为平面后, 基质吸力消失, 孔隙水压力读数为正, 滑坡体处于饱和状态, 颗粒间的水体呈现连续渗流状态。

3.2 关于土质滑坡降雨诱发破坏机理

迄今, 降雨诱发滑坡已经成为学术界共识, 但从降雨型式探索滑坡发育特性, 公开报道的研究成果较少。从模型试验中揭示的滑坡底部孔隙水压力的量测数据发现, 降雨入渗过程中, 在滑坡体表面尚未出现径流时, 滑坡体都处于非饱和状态, 入渗水体几乎都沿着土体颗粒间向滑坡体内部渗透。而一旦滑坡体表面出现径流后, 滑坡体表层便处于饱和状态, 饱和区域前端即为降雨入渗锋^[15], 表层区域土体中由于基质吸力消失, 土体膨胀, 并在重力和降雨雨滴冲击作用下发生局部滑动变形, 在降雨入渗锋达到滑坡体底部后, 滑坡体处于饱和状态, 滑坡已于出现整体滑动。从降雨型式分析, 递增型降雨对于诱发滑坡整体破坏作用明显(封二彩图 5), 而中峰型降雨更易是滑坡体表层产生坍塌破坏(封二彩图 6), 这一认识对于在预测滑坡灾情方面有积极意义。

值得指出的是, 该试验没有考虑地表下垫面特性如植物根系对滑坡变形破坏对降雨特性的响应问题, 试验结果与实际情况必然存在一定误差, 但是其揭示出来的相关规律特性对于探索考虑下垫面条件时降雨对滑坡变形破坏的影响仍然有较重要参考意义。下一步研究中, 应建立降雨作用下滑坡体内孔隙水压力与滑坡稳定性之间的应对关系。

4 结论

结合重庆境内递增型和中峰型两种降雨型式诱发滑坡灾害的实际情况, 进行降雨诱发滑坡室内模型试验, 量测了滑坡体内的孔隙水压力, 分析了孔隙水压力对降雨型式的响应特性, 得到主要结论如下:

1) 降雨作用下滑坡体内孔隙水压力变化可分成明显的 3 个阶段, 即缓变阶段、激增阶段和稳定阶段。其中缓变阶段和激增阶段约 2/3 历时时间内滑坡体均处于非饱和状态, 孔隙水压力量测数据为负, 只有激增阶段后期约 1/3 历时和稳定阶段时滑坡体才处于饱和状态。

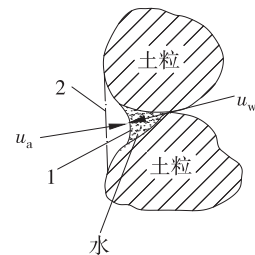


图 4 土颗粒间水-气界面与基质吸力
Fig. 4 Air-water interface and matrix suction between soil particles

2) 递增型降雨条件下各测点记录的孔隙水压力峰值点线斜率小于中峰型降雨条件下孔隙水压力峰值点线斜率,表明中峰型降雨更易使滑坡体达到饱和状态,滑坡更易发生变形和破坏。

3) 由于2#测点和3#测点之间滑坡表面存在一条裂缝,易导致降雨入渗进入滑坡体内,1#测点和2#测点记录的孔隙水压力与3#~5#测点记录的孔隙水压力之间存在显著差异,表明滑坡表面裂缝存在要推迟裂缝上部滑坡体达到饱和的时间。换言之,滑坡表面存在裂缝时,裂缝下部的滑坡体易于变形和破坏。

4) 模型试验结果表明,降雨入渗期间滑坡土体属于非饱和土体,入渗水体在颗粒之间产生弯液面,出现基质吸力,弯液面平时时基质吸力消失,土体基本达到饱和状态;并且,递增型降雨对于诱发滑坡整体破坏作用明显,而中峰型降雨更易是滑坡体表层产生坍塌破坏。

参考文献:

- [1] 林鸿洲,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
LIN H Z, YU Y Z, LI G X, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198-204.
- [2] 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):3052-3056.
CHEN J, YANG Z F, LI X. Relationship between landslide probability and rainfall in the Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3052-3056.
- [3] 张珍,李世海,马力.重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3185-3191.
ZHANG Z, LI S H, MA L. Probability analysis of relationship between landslide probability and rainfall in the Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3185-3191.
- [4] 尹洪江,王志兵,胡明鉴.降雨强度对松散堆积土斜坡破坏的模型试验研究[J].土工基础,2011,25(3):74-76.
YIN H J, WANG Z B, HU M J. Influence of rainfall intensity on loose deposits slopes failure by model tests[J]. Soil Engineering and Foundation, 2011, 25(3): 74-76.
- [5] 杨宏,冉启发,孙世国,等.降雨对厚软基底排土场滑坡破坏的模拟预测[J].露天采矿技术,2011(2):1-3.
YANG H, RAN Q F, J SUN S G, et al. Simulated prediction on huge soft base waste dump landslide failure influenced by rainfall[J]. Opencast Mining Technology, 2011 (2): 1-3.
- [6] 郑重,赵云胜,刘能铸,等.强降雨条件下浅层滑坡失稳的尖点突变机理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2012,27(1):63-67.
ZHENG Z, ZHAO Y S, LIU N Z, et al. Cusp-catastrophic instability mechanism about shallow landslide under intensive rainfall[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 27(1): 63-67.
- [7] 刘汉东,党灿,刘顺.滑坡体在降雨条件下的稳定性分析[J].人民黄河,2012,34(3):65-67.
LIU H D, DANG C, LIU S. Stability analysis of landslide under intensive rainfall[J]. Yellow River, 2012, 34(3): 65-67.
- [8] 冯汉中,徐琳娜,杨康权,等.基于小时雨量的泥石流滑坡降雨特征分析[J].高原山地气象研究,2011,31(4):18-23.
FENG H Z, XU L N, YANG K Q, et al. Feature analysis of precipitation with flow and landslide based on hour-rainfall[J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2011, 31(4): 18-23.
- [9] 张国超,范付松,赵鑫.间歇性降雨对滑坡稳定性的影响[J].安全与环境工程,2011,18(4):1-6.
ZHANG G C, FAN F S, ZHAO X. Impact of intermittent rainfall on landslide stability[J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18(4): 1-6.
- [10] 崔云,孔纪名,倪振强,等.强降雨在滑坡发育中的关键控制机理及典型实例分析[J].灾害学,2011,26(3):13-17.
CUI Y, KONG J M, NI Z Q, et al. Key dominant mechanism of heavy rain in landslide development and analysis of a typical case[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(3): 13-17.
- [11] 李德心,何思明,朱兴华,等.前期有效降雨对滑坡启动影响分析[J].灾害学,2011,26(3):41-45.
LI D X, HE S M, ZHU X H, et al. Analysis on influences of antecedent effective rainfalls on landslide initiation[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(3): 41-45.
- [12] 莫运松,董雪梅,文日海.气象因素对滑坡形成的影响分析[J].西部探矿工程,2010,22(6):51-52.
MO Y S, DONG X M, WEN R H. Meteorological factors impact analysis of landslide formation[J]. West-china Exploration Engineering, 2010, 22(6): 51-52.
- [13] 李长江,麻氏华,李炜,等.滑坡频度-降雨量的分形关系[J].中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):87-93.
LI C J, MA T H, LI W, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 87-93.
- [14] 陈洪凯,魏来,谭玲.降雨型滑坡经验性降雨阈值研究综述[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,32(5):990-996.
CHEN H K, WEI L, TAN L. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-induced landslide[J].

- Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2012, 32(5): 990-996.
- [15] 陈洪凯,唐红梅,唐云辉,等. 强降雨作用下强风化泥岩降雨入渗特性实验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2755-2760.
CHEN H K, TANG H M, TANG Y H, et al. Experimental study of infiltration characteristics of strongly weathered mudstone under action of heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2755-2760.
- [16] 陈洪凯,董平,高阳华,等. 重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(1): 46-51.
CHEN H K, DONG P, GAO Y H, et al. Study on the statistics-infiltration coupling forecast model for rainfall-induced landslide in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2015, 32(1): 46-51.
- [17] 陈洪凯,何晓英,唐红梅,等. 一种自动控制模拟降雨装置及其使用方法:201110113318.7[P]. 2011-05-04.
CHEN H K, HE X Y, TANG H M, et al. A automatic control device to simulate rainfall and its application method: 201110113318.7[P]. 2011-05-04.
- [18] 张昭,刘奉银,张国平. 考虑气-液交界面的非饱和土有效应力公式[J]. 岩土力学, 2015, 36(z1): 147-153.
ZHANG Z, LIU F Y, ZHANG G P. An effective stress formulation for unsaturated soils considering air-liquid interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(z1): 147-153.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Experimental Study on the Influence for Rainfall Characteristics to Pore Water Pressure in Landslide

CHEN Hongkai, ZHOU Xiaohan, TAN Ling

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [Purposes] Rainfall conditions is the essential reason to trigger landslides in China, and the response of pore water pressure in landslide to rainfall characteristics is the key to approach the develop mechanism of landslide. [Methods] Both of the incremental rainfall and the middle peak rainfall is the main rainfall patters induced landslide hazard in the territory of Chongqing, accordingly, the response of pore water pressure in the landslide to rainfall characteristics was analyzed through model experiment. A series of curves for pore water pressure vs. rainfall duration are achieved by model experiment. [Findings] The experimental results shows that the variation of pore water pressure in the process of rainfall can be divided into slow stage, surge stage and stable stage, and only in the late stage of the surge and the stable stage of the landslide body can reach saturated state; under the condition of incremental rainfall, the point line slope of peak value of pore water pressure in each test point is less than that of the peak value of the middle peak rainfall, it is indicated that the middle peak rainfall can make the landslide reach saturated state easier. The cracks in the surface of the landslide can affect the rainfall infiltration characteristics significantly, in the following part of the crack, the deformation and failure of the landslide are more likely to happen. The experimental results are discussed in views of unsaturated mechanics. [Conclusions] The research results for the further study of the quantitative effect of rainfall on the stability of landslide have positive significance.

Keywords: soil landslide; pore water pressure; rainfall characteristics; model experiment

(责任编辑 许 甲)