

三峡库区滑坡土体降雨产流及入渗试验研究

乔娟¹, 张立仁¹, 阮祥明²

(1. 三峡大学 科技学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国水电顾问集团 贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 三峡库区滑坡地质灾害数量众多, 主要诱因为降雨。以该地区具有代表性的土质滑坡土体为对象, 综合考虑了三峡库区 1971 年至 2003 年的 230 次滑坡地质灾害与降雨因素之间的关系, 进行了室内降雨模型试验的设计, 以探究其降雨产流及入渗规律。通过对试验结果的综合分析及比较, 揭示了相应试验工况下的降雨产流及饱和-非饱和-非稳定入渗规律、地表冲刷及裂缝发育情况, 同时也分析了降雨强度、前期累计降雨量及坡角三个因子对降雨过程中的坡面产流及入渗的影响。

关键词: 三峡库区; 土质滑坡; 降雨过程; 产流-入渗规律; 模型试验

中图分类号: TV170.50

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2013)05-0183-06

Experimental Study on Rainfall Runoff and Infiltration of Landslide Soil in Three Gorges Reservoir Area

QIAO Juan¹, ZHANG Li ren¹, RUAN Xiang ming²

(1. College of Science and Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Guiyang Investigation and Design Institute, China Hydropower Consultant Group, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: There are numerous geologic hazards from landslide in Three Gorges Reservoir area, and the main inducement is rainfall. Here, taking the typical soil of this district's landslide as the object, and considering the relationship between the 230 geologic hazards from landslide and the rainfall in Three Gorges Reservoir area synthetically, a series of indoor rainfall's model tests is carried out to explore the rainfall runoff and infiltration law of landslide soil. With the synthetical analysis and comparison to the results of the tests, the rainfall runoff law and saturated-unsaturated and unsteady infiltration law under corresponding test conditions are revealed, and the conditions of the surface erosion and fracture's development under the corresponding test conditions are also revealed in detail. Simultaneously, the influencing ways of the rainfall intensity and cumulative rainfall and slope angle to the surface runoff and infiltration in rain process are analyzed.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; soil landslide; rainfall process; runoff infiltration law; model test

三峡库区地质灾害较严重, 目前库区已查获潜在崩塌、滑坡 2 550 余处, 总体积约 40 亿 m³, 泥石流沟 90 余条^[1-4]。另三峡库区又是多暴雨的地区, 从以往有关三峡库区滑坡的文献报导^[1-9], 降雨是诱发库区滑坡的最主要因素。基于以上现状, 本研究通过试验设计, 探究了三峡库区典型滑坡土体的降雨产流规律及入渗规律, 以期为该地区潜在或已滑滑坡体的数值计算分析及安全监测提供参考依据。

近年来关于降雨产流、产沙及入渗过程方面的试验研究报道颇多, 如耿晓东等研究了地表坡度和雨强因素对红壤土的降雨入渗、产流及产沙过程的影响, 以期对红壤丘陵区坡耕地水资源管理、建立产

流模型等提供依据^[10]; 穆天亮等进行了黄土坡面降雨产流及入渗过程的试验及数值解析对比研究, 通过试验结果改进相应的数值解析模型^[11]; 付智勇^[12]、龙天渝^[13]等也对三峡库区紫色土坡耕地的降雨产流及入渗机理进行了试验研究; 史志华等^[14]进行了三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验研究; 另外田东方等^[15]通过数值计算, 研究了雨强、土体类型、坡度等因素对三峡库区边坡的降雨入渗与产流过程的影响。参考以上文献资料, 本研究试验设计的边界条件主要考虑了降雨强度、前期累计降雨量及地表坡度等因素。

1 试验设计

1.1 试验装置

本次降雨产流及入渗模型试验采用内部尺寸为长、宽和高分别为 95 cm、90 cm、20 cm 的玻璃容器，

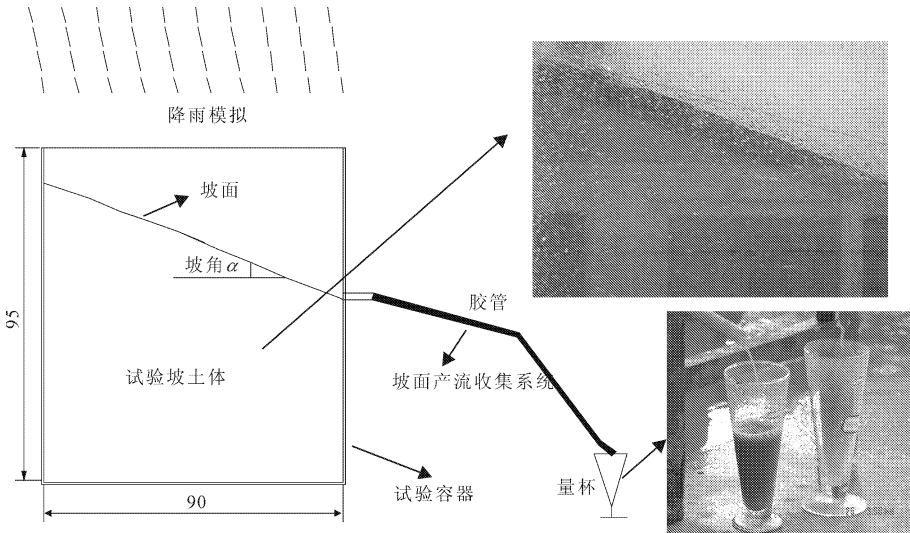


图 1 降雨产流及入渗模型试验装置(单位: cm)

1.2 试验材料的选取

对三峡库区滑坡资料的搜集与统计分析知^[1-4]，秭归地区境内的长江干、支流流域是三峡库区滑坡分布的主要地段之一，共 516 处，且以土质滑坡为最多，约占 88%，土质滑坡体的地表坡度大多为 15°~ 35°，滑体物质成份主要为含砾粉质粘土、碎石土和人工堆积物，粘性土多呈可塑状，分布厚度大多在 2 m~ 20 m 不等。

如图 1 所示，试验过程中土壤含水率的测量方法采用烘干法，土体湿润锋的运动情况采用数码相机摄像的光学测量方法记录，降雨产流量过程中的挟泥沙量由试验装置配套的量杯收集，降雨过程的模拟采用喷洒式降雨模拟系统。

千坪坝滑坡位于秭归县沙镇溪镇青干河岸，发生于 2003 年 7 月 13 日，滑坡之前遭遇 6 月 21 日至 7 月 11 日的连续降雨过程，其滑体材料以粉质粘土体为主^[8-9]，经比较分析认为，其在三峡库区分布的滑坡中具有一定代表性，故本次降雨产流及入渗模型试验研究拟选取该滑坡的滑体土为试验材料，土体的物理性质指标见表 1，颗分曲线见图 2。该土体不均匀系数 $C_u = 15$ ，曲率系数 $C_c = 6.7$ ，级配为不良的。

表 1 试验土样的物理性质指标表

干密度 ρ_d /($g \cdot cm^{-3}$)	比重 G_s	孔隙比 e	饱和渗透系数 K_s /($cm \cdot s^{-1}$)	饱和体 积含水 率 θ_s /%	初始体 积含水 率 θ_0 /%	土粒组成 / %							
						砂粒/mm			粉粒/mm			粘粒/mm	
1.552	2.48	0.597	2.32×10^{-7}	37.4	8	5- 2	2- 1	1- 0.5	0.5- 0.25	0.25- 0.1	0.1- 0.075	0.074- 0.005	< 0.005
						10.3	2.3	8.2	6.7	8.9	3.0	50.6	10

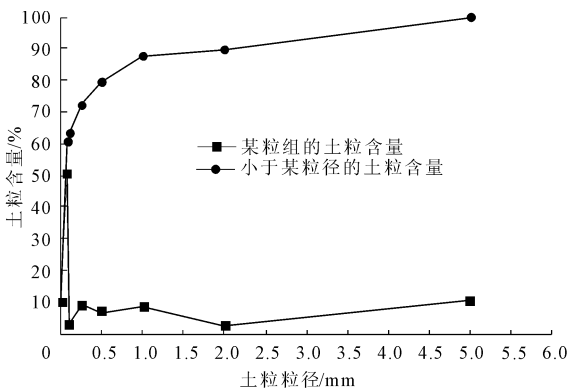


图 2 试验土体的颗粒分析曲线

1.3 试验过程降雨因素的考虑

对三峡库区降雨与滑坡地质灾害之间关系的资料^[7]进行搜集整理可知，1971—2003 年的 230 次滑坡地质灾害中，与当日降雨量的关系如表 2 所示，与前期累计雨量的关系如图 3 所示。可见滑坡的发生与暴雨强度的大小基本成正比，与前期累计雨量及降雨历时的大小成正比。

综合考虑库区滑坡地质灾害的发生与降雨强度、前期累计降雨量及降雨时间等的关系，本降雨试验重点研究的降雨现象因素包括降雨强度和前期累

计降雨量。

表 2 三峡库区滑坡灾害与当日降雨量关系表

当日雨量 (雨型)/mm	滑坡 次数	发生 概率/%	累计 概率/%
小雨[0, 10)	38	16.5	16.5
中雨[10, 25)	46	20.0	36.5
大雨[25, 50)	56	24.3	60.8
暴雨[50, 100)	61	26.5	87.3
大暴雨[100 以上)	29	12.6	99.9

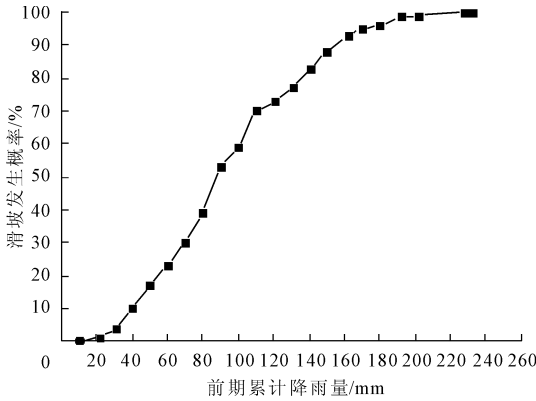


图 3 滑坡概率与累计降雨量关系图

1.4 试验方案设计

根据上述对库区滑坡资料及滑坡地质灾害与降雨之间关系资料的分析, 现制定三组三峡库区滑坡土体的降雨产流及入渗模型试验, 试验方案如下:

(1) 方案 1—不同降雨强度边界条件的降雨产流及入渗模型试验

取模拟地表坡度为 20° , 降雨边界条件为日降雨量大到暴雨、同降雨历时不同降雨强度的降雨现象。降雨历时均为 1 h, 具体的试验方案如表 3 所示。

表 3 不同降雨强度边界条件的降雨产流及入渗模型试验表

试验号	1	2	3
降雨类型	大雨	暴雨	暴雨
降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.62	0.72	1.2
降雨量/mm	37.2	43.2	72

(2) 方案 2—不同前期累计降雨量的降雨产流及入渗模型试验

取模拟地表坡度为 20° , 前期累计降雨量不同, 但降雨边界条件均为日降雨量为大雨的同一降雨现象。降雨强度设计为 0.62 mm/min , 历时 1 h, 具体的试验方案如表 4 所示。

(3) 方案 3—不同坡角的库区滑坡土体的降雨产流及入渗模型试验

由库区常见土质滑坡体的地表坡度多为 $15^\circ \sim 35^\circ$ 这一特点, 本文设计了地表坡度分别为 20° 、 25° 的二组降雨模型试验, 试验号分别为 7、8, 用以研究地貌特征对库区滑坡土体降雨产流及入渗现象的影响。二组试验的降雨边界条件均取降雨历时为 1 h、降雨强度为 0.62 mm/min 的大雨降雨过程。

表 4 不同前期累计降雨量的降雨产流及入渗模型试验表

试验号	4	5	6
前期累计降雨量/mm	0	37.2	74.4
降雨量/mm	37.2	37.2	37.2

2 试验过程中降雨入渗的饱和-非饱和-非稳定渗流现象

本系列降雨产流及入渗模型试验的降雨强度均大于试验土体的饱和渗透系数。现以降雨强度 0.72 mm/min 、土体坡度 20° 的试验号为 2 的降雨产流及入渗模型试验的坡面产流率与降雨时间之间的关系为例, 来说明降雨入渗过程中的饱和-非饱和-非稳定渗流现象。

如图 4 所示, 整个降雨入渗过程可分为降雨强度控制入渗阶段、非饱和土控制入渗阶段和饱和土控制入渗阶段。现设 $R(t)$ 、 $q(t)$ 及 $i(t)$ 分别为降雨过程中产流率、降雨强度、入渗率随降雨时间变化的函数, α 为坡面角度, a 、 b 为常数, 分别表示降雨强度值及稳定产流率, 本文将产流率定义为单位时间内、单位斜坡面积上的产流量。则对于本次试验, 恒定降雨强度下的降雨产流及入渗的饱和-非饱和-非稳定过程, 可由以上三个函数表示, 见式(1)至式(3), 其中 $R(t)$ 及 $i(t)$ 分别为降雨过程中坡面的平均产流率及平均入渗率。

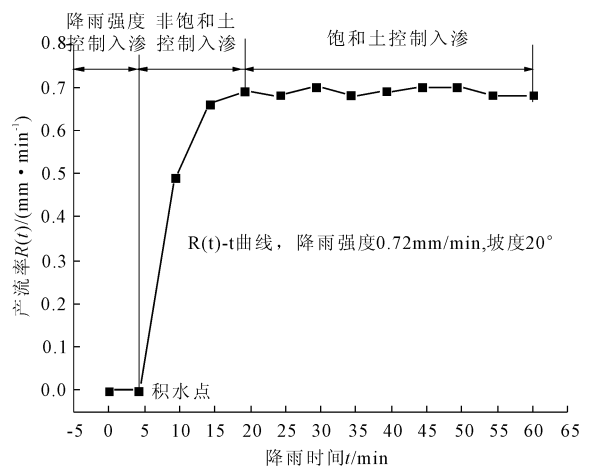


图 4 坡面产流率随降雨时间变化规律曲线

(1) 降雨强度控制入渗阶段:

$$q(t) = a, R(t) = 0, i(t) = a - C(t) \quad (1)$$

(2) 非饱和土控制入渗阶段:

$$q(t) = a, 0 < R(t) < b, i(t) = a - R(t)/\cos \alpha - C(t) \quad (2)$$

(3) 饱和土控制入渗阶段:

$$q(t) = a, R(t) = b, i(t) = a - b/\cos \alpha - C(t) \quad (3)$$

图 5 为 2 号降雨产流及入渗模型试验的坡土体剖面体积含水率随时间分布情况。

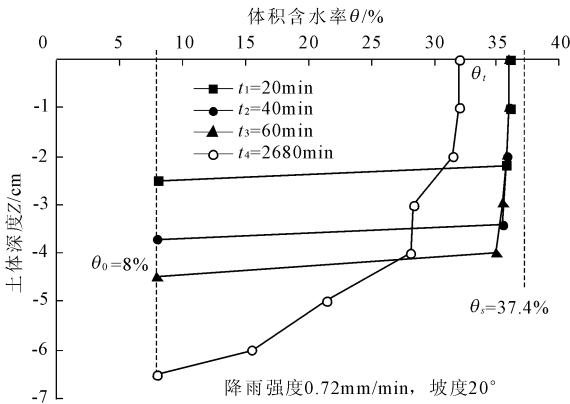


图 5 土壤体积含水率随时间分布曲线

3 降雨过程中的坡面产流及入渗的影响因子分析

3.1 降雨强度对产流及入渗过程的影响

本研究设计的方案 1 为不同降雨强度边界条件的降雨产流及入渗模型试验, 图 6 及图 7 为不同降雨强度坡面平均产流率及坡体中间剖面湿润锋面位置随时间变化曲线。

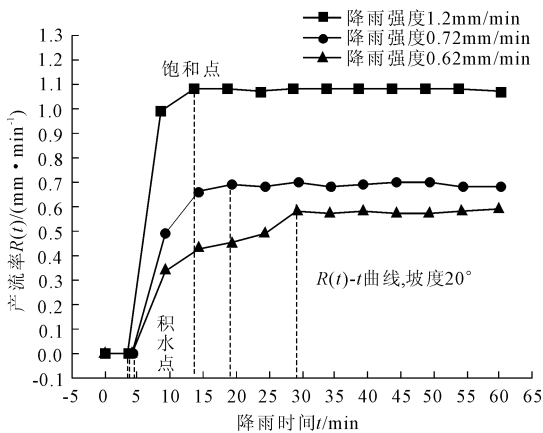


图 6 不同降雨强度坡面产流率随时间变化曲线

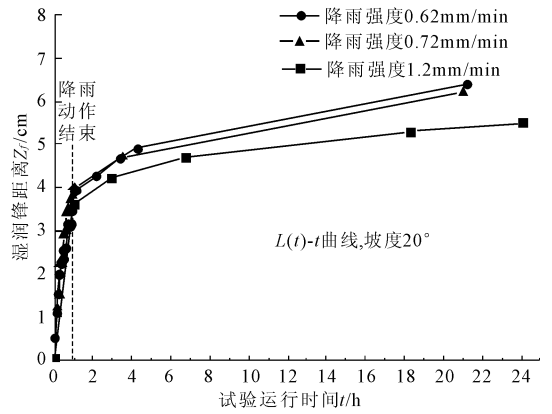


图 7 不同降雨强度坡体湿润锋随时间变化曲线

(1) 结合图 6 及式(1)、式(3)可以看出, 随着降雨强度的增加, 坡面积水及形成稳定流渗的时间相应地缩短, 但三种降雨强度产生坡表径流的时间相差不多, 均在 5 min 内, 主要原因应该是土体的饱和渗透系数较小, 而降雨强度等级相近。

(2) 由图 7 可见, 降雨过程中, 随着降雨时间的增加, 坡体湿润锋 Z_f 随时间变化曲线的斜率逐渐变小。降雨结束后, 降雨强度越大, 则坡面湿润锋 Z_f 值越小, 说明降雨强度越大的降雨, 累计入渗至坡体内的水分越少。

(3) 由图 6 及图 7 可知, 对于不同雨强的降雨过程, 其坡面产流率随时间变化曲线及坡体湿润锋 Z_f 值随时间变化曲线趋势均相同。

3.2 前期累计降雨量对产流及入渗过程的影响

本研究设计的方案 2 为不同前期累计降雨量的降雨产流及入渗模型试验, 图 8 及图 9 分别为同降雨强度、不同前期累计降雨量的降雨过程的坡面平均产流率及坡体中间剖面湿润锋面位置随时间变化曲线。

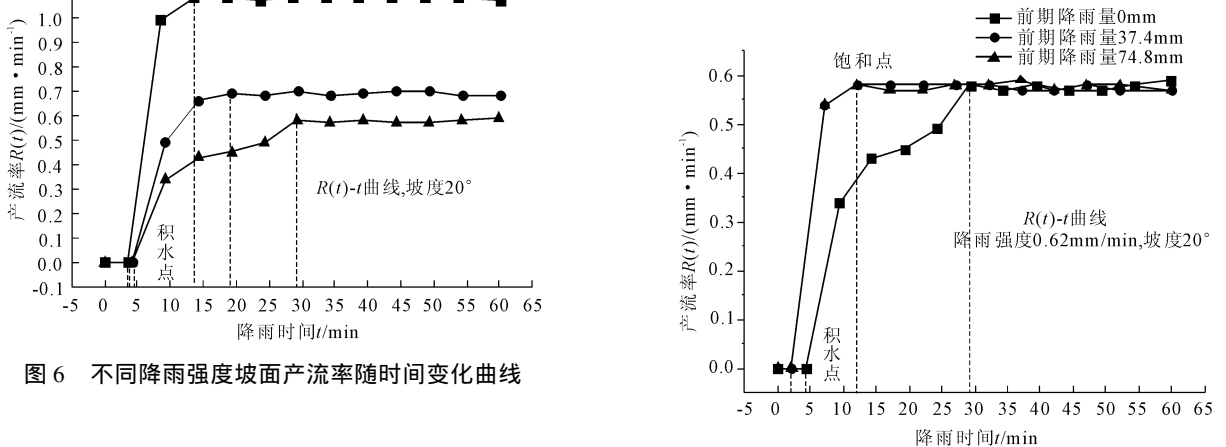


图 8 不同前期累计降雨量降雨产流率随时间变化曲线

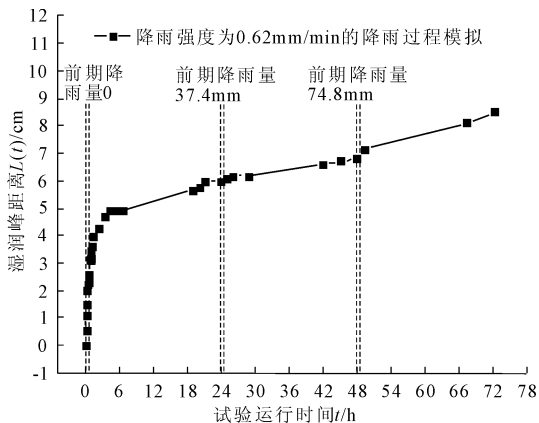


图 9 不同前期累计降雨量湿润锋随时间变化曲线

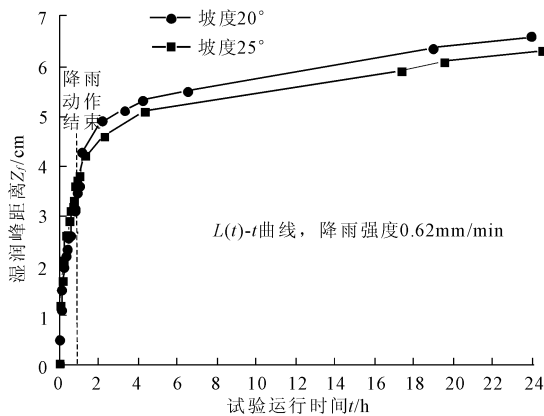


图 11 不同土体坡度坡体湿润锋随时间变化曲线

(1) 由图 8 可见, 对于降雨强度相同而前期累计降雨量不同的降雨过程, 随着前期累计降雨量的增加, 坡面积水及形成稳定流渗的时间相应地缩短, 但坡面产流率随时间变化曲线趋势相同。

(2) 由图 9 可见, 若存在前期降雨, 并在降雨入渗过程中出现饱和土控制入渗阶段, 则对于雨强相同的降雨过程, 坡土体的降雨产流及入渗过程基本相同, 与前期累计降雨量的多少关系甚微。

(3) 由图 9 可见, 对于雨强相同的三次降雨, 当前期累计降雨量为 0 时, 降雨过程对坡土体湿润锋 Z_f 值变化的影响最大, 而当存在前期降雨, 并在降雨入渗过程中出现饱和土控制入渗阶段, 则降雨过程对 Z_f 值的影响甚微。总的来说三次降雨结束后, Z_f 值随时间的变化情况基本一致。

3.3 坡角对产流及入渗过程的影响

本研究设计的方案 3 为不同坡角的库区滑坡土体的降雨产流及入渗模型试验。图 10 及图 11 为坡角不同、雨强相同的降雨过程坡面平均产流率及坡体中间剖面湿润锋面位置随时间变化曲线。

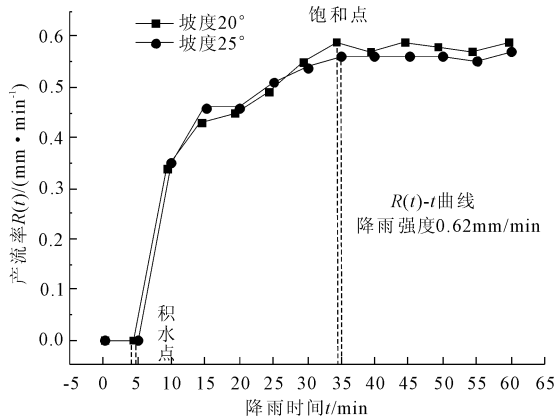


图 10 不同土体坡度的降雨产流率随时间变化曲线

由二图可以看出, 对于坡面水平长度相同而坡角不同的坡体, 当降雨边界条件相同时, 其坡面产流及入渗过程基本相同, 降雨过程中坡体的湿润锋 Z_f 值随时间的变化情况也基本相同。但在降雨结束后, 坡角较小的 Z_f 值的变化量要大于坡角较大的。

4 基于试验结果的降雨诱发滑坡的外因分析

表 5 为各组降雨产流及入渗模型试验的产泥沙量及地表裂缝情况表。图 12 为不同前期累计降雨量的降雨产生的地表裂缝及冲刷情况图。图 13 为坡角 20°、降雨强度 1.2 mm/min、无前期降雨的降雨过程结束一个月后的斜坡体内部及地表裂缝情况, 地表裂缝由降雨结束后的 3 mm 增加至 15 mm, 并且在降雨入渗的湿润锋面位置出现平行于斜坡表面的裂缝。

表 5 各次降雨试验的产泥沙量及裂缝情况表

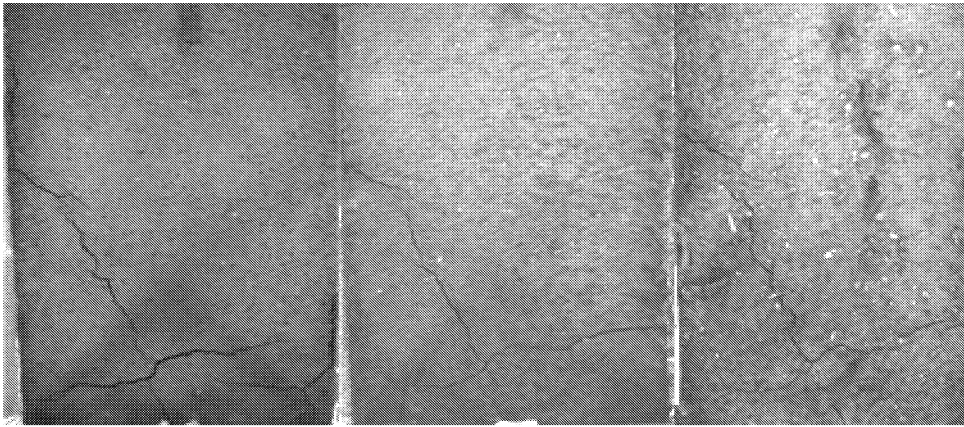
降雨强度 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.62	0.62	0.72	1.2	0.62	0.62
坡度 / ($^\circ$)	25	20	20	20	20	20
前期降雨量 / mm	0	0	0	0	37.2	74.4
产泥沙量 / ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)	3.8	2.8	3	3.8	8.4	9.3
降雨结束一天后最大地表裂缝 / mm	4	2	4	3	1	1
裂缝在坡体上位置	前缘及中部、分支较多	整个坡面	前缘及中部	前缘及中部	整个坡面	整个坡面

由图 12、图 13 及表 5 可得出如下几点结论:

(1) 若前期累计降雨量为 0, 则地表坡度及降雨强度对降雨过程中产生的地表径流中泥沙含量多少

的影响均不大,相对来说雨强较大或坡度较陡的情况在降雨过程中产生的地表径流泥沙量较大。而当前期累计降雨量不为 0,且在降雨入渗过程中出现饱和土控制入渗阶段,则与前期降雨相同雨强的降

雨过程的地表径流泥沙量约为前期降雨过程的地表径流泥沙量的 3 倍,且地表的沙化及冲沟现象逐渐加重,越容易引起滑坡及泥石流等地质灾害。



前期累计降雨量0
降雨强度0.62mm/min

前期累计降雨量37.2mm
降雨强度0.62mm/min

前期累计降雨量74.4mm
降雨强度0.62mm/min

图 12 降雨及积水作用对坡表的冲蚀及裂缝变化图

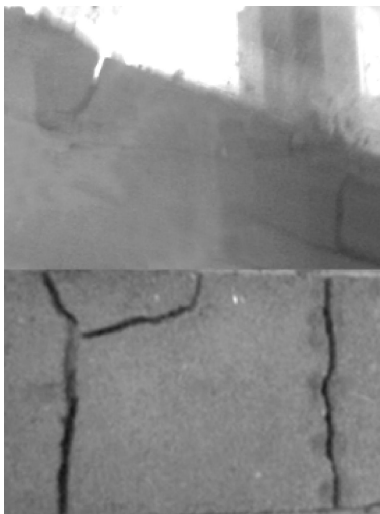


图 13 降雨结束一月后地表裂缝情况图

(2) 对于同一斜坡土体,当无前期降雨时,降雨结束后,雨强大的降雨引起的地表裂缝发展较迅速,而雨强小的降雨引起的地表裂缝发展范围较大。对于雨强较小的降雨过程,降雨结束后,坡度较陡的斜坡土体地表裂缝发展较迅速,而裂缝范围较小,但分支仍较多。对于同一斜坡土体,若存在前期降雨,并在降雨入渗过程中出现饱和土控制入渗阶段,则在降雨过程中,原有地表裂缝暂时闭合。降雨过程结束后,地表裂缝的发展速度远小于无前期降雨的情况,但仍沿原有地表裂缝发育。

可见无前期降雨时,降雨强度较小而坡度较陡

时,降雨造成地表裂缝的发育速度较快,而地表裂缝范围也较大,对斜坡稳定性的影响也较为不利。

5 结 语

本文在对三峡库区滑坡分布及其与降雨量、降雨类型、降雨持续时间等关系进行分析的基础上,设计了库区滑坡土体的降雨产流及入渗模型试验,得出了不同降雨工况下库区斜坡土体的降雨产流及入渗规律,分析了降雨过程中的坡面产流及入渗的影响因子,并通过试验得出了降雨与产生滑坡地质灾害的冲刷、裂缝等外因之间的关系,这些都可为以后三峡库区斜坡体稳定性的预测及监测、滑坡地质灾害成因分析提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] 叶殿秀,张强,朱蓉.三峡库区强降雨诱发地质灾害研究[M].北京:气象出版社,2005:97-106.
- [2] 刘传正,刘艳军,温铭生,等.长江三峡库区地质灾害成因与评价研究[M].北京:地质出版社,2007:88-107.
- [3] 郭希哲,黄学斌,徐开祥,等.三峡工程库区崩滑地质灾害防治[M].北京:中国水利水电出版社,2007:18-152.
- [4] 廖巍,刘新喜.三峡库区滑坡稳定性评价研究[J].中国安全科学学报,2004,14(9):104-107.
- [5] 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].岩土学报,1999,20(1):F14.

3.6 地下水环境影响分析

研究区内河流原河道和改道后地下水水位动态变化情况对比结果表明: 其水位变化幅度很小, 且流场方向没有发生明显变化。研究区内的补给量和排泄量均没有发生变化, 水位降深变化不大, 对地下水流场的影响很小。

通过埋深预测的结果表明, 河流改道后, 地下水埋深在 5 m~ 20 m 的面积增大了, 小于 4.5 m 埋深的面积减小了, 但其增减的量均很小。根据现有的研究结果^[8], 灌区土壤盐分的运移受地下水埋深影响显著, 表层盐分上移的速率随地下水埋深增大而减小。河流改道工程的实施不会使本区域地下水空间分布格局发生明显改变, 不会对本区域内的土壤盐渍化造成不利的影晌。

4 结 语

(1) 研究区内的多年平均地下水总补给量为 $658 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 其主要补给源为河水入渗补给和灌区入渗补给, 占总补给量的 64%; 地下水排泄主要是地下水侧向径流流出, 排泄量为 $626 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(2) 通过模型对河流原河道和改道后的地下水水位预测对比, 研究区内的地下水流场没有发生明显变化, 地下水等埋深面积的变化较小。

(3) 河流改道工程实施后, 研究区内的地下水补给、排泄量基本不变, 对河流下游地下水的补给量

影响不大。河流改道后不会使本区域地下水空间分布格局发生明显改变, 不会对本区域内的土壤盐渍化造成不利的影晌, 对研究区内的地下水流动态影响较小。

参考文献:

- [1] 吴文强, 李文文, 刘君利. 水均衡与数值模拟法在地下水资源评价中对比应用[J]. 中国农村水利水电, 2009, 6: 45-48.
 - [2] 邵景力, 赵宗壮, 崔亚莉, 等. 华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 361-367.
 - [3] 徐海珍, 李国敏, 黎明, 等. 基于数值模拟的天津市地下水严重超采区演变分析[J]. 工程勘察, 2011, 39(11): 35-40.
 - [4] 杨宗杰, 李 晓, 王开章. 基于 GMS 的博兴县南部区域浅层地下水流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2011, 5: 24-27.
 - [5] 张岩松, 贾海峰. 北京典型平原区地下水环境模拟及情景分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 1436-1440.
 - [6] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
 - [7] 李 凯, 简文彬, 周倍锐. 某厂区防渗工程地下水数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 78-82.
 - [8] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210.
-
- (上接第 188 页)
- [6] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21-23.
 - [7] 殷坤龙, 汪 洋, 唐仲华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(1): 75-78.
 - [8] 三峡库区地质灾害防治工作指挥部. 湖北省秭归县沙镇溪镇干将坪滑坡[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3).
 - [9] 乔 娟, 罗先启, 张立仁, 等. 三峡库区水环境对库岸斜坡失稳的作用机理探讨[J]. 水科学与工程技术, 2005, (6): 22-25.
 - [10] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.
 - [11] 穆天亮, 王全九, 王 辉. 黄土坡面定雨强入渗产流物理基础模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 199-203.
 - [12] 付智勇, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 三峡库区不同厚度紫色土坡耕地产流机制分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 680-688.
 - [13] 龙天渝, 卢齐齐, 王玉霞. 人工模拟暴雨条件下紫色土坡耕地入渗过程研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 76-79.
 - [14] 史志华, 陈利顶, 杨长春, 等. 三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6785-6792.
 - [15] 田东方, 刘德富, 周明涛. 边坡降雨入渗与坡面径流影响因素敏感性分析[J]. 水力发电, 2010, 36(4): 11-14.