

降雨对黄土裸坡坡面形态影响的室内模型试验

武彩萍, 骆亚生, 陈伟, 李丹

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:黄土高原坡面的侵蚀主要发生在降雨集中的 6—9 月, 坡面会遭到严重破坏, 更甚者造成滑坡。建立了黄土裸坡的室内模型并模拟人工降雨, 通过综合监测来观察降雨过程中坡面形态的变化并分析降水入渗对黄土滑坡的影响。试验结果表明: (1) 降水入渗速率由快到慢; 径流量/入渗量的值随时间先增长, 再减小, 最后稳定; 坡顶的降水入渗速率始终大于坡面; (2) 坡顶首先产生贯通的拉裂缝, 然后坡体内部产生局部微小竖向裂缝, 位移方向为坡顶下方竖直向下, 坡面下方略大于 45°; (3) 坡面侵蚀经历了“片蚀—沟蚀—沟间坡面面蚀向深切和侧蚀发展”的过程, 最终沟岸发生崩塌, 坡面因受侵蚀呈整体下降趋势; (4) 坡面崩滑从坡趾处自下而上发展。

关键词:黄土; 坡面形态; 降雨入渗; 滑坡; 室内模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0115-05

中图分类号: P642

Indoor Model Experiment for Rainfall Effects on Bare Loess Slope Shape

WU Cai-ping, LUO Ya-sheng, CHEN Wei, LI Dan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil erosion on the Loess Plateau mainly occurs from June to September during which high intensity rainfall occurs correspondingly, which always leads to severe damages to slope surface and even causes landslides. In this study, an indoor model of bare slope was established and the artificial rainfall device was set up over the slope. The changes of slope shape were observed and the effects of water infiltration on the loess landslides were analyzed through comprehensive monitoring. Results show that: (1) the water infiltration rate was low and the ratio of runoff to infiltration first increased and then dropped to a steady level with the increased time. Water infiltration rate at slope top was always greater than that on the slope surface. (2) After tensile cracks were generated at slope top, small vertical cracks were created locally inside the slope. The displacement directions were vertical below the slope top and slightly greater than 45° on the low slope section. (3) Erosion on the slope experienced the process of "shear erosion—gully erosion—deep and lateral erosion in the slope of ditch", and ultimately the gully bank collapsed. The whole slope moved downwards due to the erosion on the slope surface. (4) The landslide developed from the toe of the slope to the top.

Keywords: loess; slope pattern; rainfall infiltration; landslide; indoor model

中国黄土和黄土状土广泛分布, 总面积约为 $6.40 \times 10^5 \text{ m}^2$ ^[1]。黄土地区灾害频繁发生, 危害严重, 其中黄土高原普遍存在坡面侵蚀问题, 主要发生在降雨集中的 6—9 月, 轻则黄土坡面会遭受破坏, 重则降雨入渗可能会导致黄土滑坡的发生^[2]。坡地土壤侵蚀过程中土粒的运移不仅使土壤颗粒的流失、淤积水库渠道、抬高河床、水土环境恶化, 而且在水土流失的过程中同时会导致土壤养分的流失, 降低土地生产力, 使有限的耕地面临严重退化^[3]。黄土滑坡具有规模

大、危害强、预测难等特点^[4]。大型黄土滑坡会阻塞交通、堵截河流、摧毁良田林木, 造成严重的社会经济损失, 甚至掩埋村庄城市、侵夺人民的生命^[5]。例如, 2011 年 10 月 17 日陕西省西安市灞桥区发生由强降雨引发的山体滑坡, 造成附近砖厂和某公司部分车间被埋, 10 人死亡 22 人失踪, 另有 5 人受伤。为进一步保障人民生命财产安全, 开展降雨条件下黄土坡面形态变化和滑坡发生发展的理论和试验研究有重要的意义。

收稿日期: 2012-08-15

修回日期: 2012-09-17

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“基于土体结构性变化的黄土滑坡灾变机理研究”(51178392)

作者简介: 武彩萍(1986—), 女(汉族), 陕西省神木县人, 硕士生, 研究方向为黄土的工程性质及应用。E-mail: 595392621@qq.com。

通信作者: 骆亚生(1967—), 男(汉族), 陕西省泾阳县人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程方面的研究工作。E-mail: lyas@public.xa.sn.cn。

关于黄土坡面形态的研究需作大量的理论分析,更依赖于试验技术的发展,室内模型试验应运而生。其中室内人工降雨模型试验是一种有效的方法^[6-7],可以直接用来观察整个降雨过程中坡面形态随时间的变化和滑坡发生发展的过程。沈波等^[8]系统地进行了压实黄土路基边坡的人工降雨入渗和冲蚀试验,研究了黄土路基边坡的相关性状。谢妮等^[9]对非饱和黄土边坡在降雨入渗情况下的吸力、变形以及径流量等进行了详细的研究。林鸿州等^[10]根据人工降雨边坡物理试验模型给出合适的雨量预警参数。贾官伟等^[11]通过大型模型试验研究了水位聚降条件下临水边坡的失稳原因及模式。

本文在前人研究的基础上为分析降雨对黄土裸

坡坡面形态的影响,建立了人工降雨条件下黄土坡面的室内模型,所用黄土取自陕西省杨凌区,并通过水分传感器、示踪点、数码拍摄等监测观察了强降雨过程中黄土坡面形态的变化,同时分析了降水入渗对黄土坡面崩滑的影响。

1 材料与方法

1.1 试验黄土

试验所用黄土取自陕西省杨凌区揉谷乡,取土深度 3.0~5.0 m,属 Q_3 黄土。天然干密度 1.52 g/cm^3 ,天然含水率 18.2%,最大干密度 1.70 g/cm^3 ,其物理性质如表 1 所示。原土料过 1 cm 筛,含水率控制在天然含水率左右以供模型填土使用。

表 1 试验黄土的物理性质

| 试验地点 | 比重 | 液限/ % | 塑限/ % | 塑性指 数/% | 颗粒组成/% | | | 按塑性指数 分类 |
|------|------|----------|----------|------------|----------|---------------|-----------|-------------|
| | | | | | >0.05 mm | 0.05~0.005 mm | <0.005 mm | |
| 陕西杨凌 | 2.71 | 35.80 | 17.50 | 18.30 | 51.33 | 28.34 | 20.33 | 低液限黏土(CL) |

1.2 试验装置

试验装置由模型槽和降雨装置组成。模型槽三面为砖砌墙体,一面为有机玻璃,分别用槽钢加固以保证结构的强度和稳定。采用的人工降雨装置包括供水系统、过滤器、流量表、供水管、喷头以及起支撑作用的金属结构。

供水管主管外径 32 mm,支管外径 20 mm,主管沿长度方向布置,相距 2 m,其间每隔 40 cm 设置 1 根支管,每根支管的 40(30)cm,100 cm,160(170)cm 处各装 1 个雾状喷头,用两通管和三通管连接,共 33 个喷头以保证降雨均匀。

1.3 模型尺寸及监测设备

模型长 4.6 m,宽 2 m,坡度 45° ,最高处 2.5 m。传感器埋在模型中间同一竖直平面内,模型尺寸和传感器位置如图 1 所示。

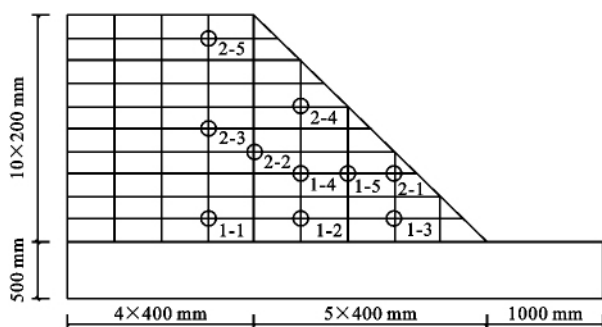


图 1 模型尺寸及传感器位置示意图

监测设备的选择、埋设与研究的目的直接相关。本试验所用监测工具为水分传感器(埋在坡体内部动态监测不同位置的体积含水率)、数码摄像机(设在距有机玻璃一侧 4 m 处用于观测水分在坡体中下渗的位置线以及示踪点情况)、数码照相机(拍摄坡面形态变化过程并记录各处裂缝等)。其中,水分监测系统有 2 套,每套 5 个通道,共 10 个传感器,埋设位置的选定以分布在坡体各个部位及理论滑坡位置为原则。示踪点埋设在图 1 中每个格子中心点,随土体一起移动以观测坡体位移矢量。坡面不同位置插有小红旗子以便在观察坡面形态变化时作为位置参考。

1.4 模型建立

模型填土:在水泥墙一侧标出每层填土和各个传感器的位置,在有机玻璃上用记号笔做成 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的网格;土料过 1 cm 筛,含水率控制在天然含水率左右;分 11 层填土,第 1 层为 50 cm,其余每层 20 cm;在对应位置埋设该层传感器和示踪点;每层选择 4 个不同位置用环刀取样测量含水率和干密度;在坡面用棉线铺成 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的网格,并在网格正中间插上编有号码的小旗子。土层填筑完成后,用塑料布遮盖静置一周使土体内部应力状态均匀,颗粒之间胶结形成,同时防止水分散失。坡体内部含水率和干密度大致均匀,约为 $w=13.9\%$, $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ 。

1.5 试验过程

从 2012 年 5 月 19 日上午 9:56 开始降雨试验,共降雨 7 次,降雨情况及各项数据如表 2 所示。其中

总降雨量 7.246 7 m³,有效降雨时间 8 h 48 min,历时 21 h 22 min。至 5 月 20 日 7:10 模型发生滑坡,试验结束。

降雨过程形成的表面径流从正面围堵一侧流出

后用 25 L 水桶轮流接取测量。本试验降雨强度设计为大雨至暴雨,因降雨喷头的出水是由人为通过阀门控制,加之水源不稳定和读数误差,导致每次降雨强度不一致,但同一次降雨的雨强是均匀的。

表 2 试验过程降雨情况

| 时间 | 0519 (9:56—10:19) | 0519 (11:02—11:11) | 0519 (16:05—17:56) | 0519 (20:47—22:23) | 0502 (23:55—01:00) | 0502 (01:58—03:24) | 0502 (05:00—07:18) |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 累计时间段/min | 0—23 | 66—75 | 369—480 | 651—747 | 839—904 | 962—1 048 | 1 144—1 282 |
| 降雨历时/min | 23 | 9 | 111 | 96 | 65 | 86 | 138 |
| 间隔时间/min | 0 | 43 | 294 | 171 | 92 | 58 | 96 |
| 降雨量/mm | 22.40 | 20.80 | 175.70 | 148.70 | 80.00 | 143.80 | 196.30 |
| 降雨强度/(mm·h ⁻¹) | 58.50 | 138.30 | 95.00 | 92.90 | 73.80 | 100.30 | 85.40 |
| 径流量/(L·s ⁻¹) | 0 | 0.08 | 0.09 | 0.12 | 0.13 | 0.16 | 0.14 |
| 入渗量/(L·s ⁻¹) | 0.15 | 0.27 | 0.16 | 0.11 | 0.06 | 0.10 | 0.08 |
| 径流量/入渗量 | 0 | 0.29 | 0.55 | 1.08 | 2.12 | 1.60 | 1.75 |

2 结果与分析

2.1 降雨入渗及含水率变化

降雨过程中径流量/入渗量随时间的变化趋势如图 2 所示。

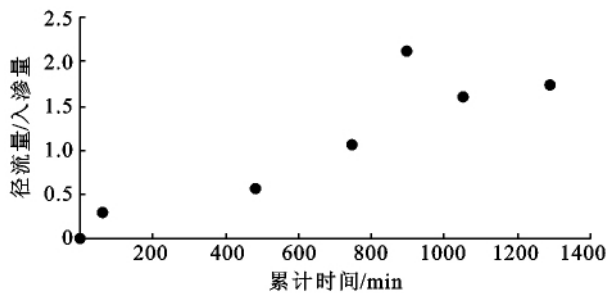


图 2 降雨过程中径流量与入渗量的比值随时间的变化

由图 2 可知,径流量与入渗量的比值随时间的推移呈现先增长后减小最终稳定的趋势。降雨条件下

水分存在逐渐入渗和重新分布的过程,降雨初期坡体较干,水分少,开放孔隙较多,水分沿孔隙迅速渗入土体内部,使径流量最少,第 1 次观测径流量为 0。随着降雨持续,土体含水量增大,孔隙被充满,土体渗透性变差,水分来不及全部下渗而形成表面径流。累计时间在 0—23 和 839—904 min 内时径流量/入渗量增长趋势较大,这 2 个阶段的雨强分别为 58.5 和 73.8 mm/h,较其他阶段偏小。说明雨强和降水入渗存在一定的关系:降雨强度过大,对坡面冲蚀严重且降水不能及时入渗而使径流量较大。降雨强度较小时降水不易流失而在坡面停留时间较长,降水入渗较多而径流量较小。

图 3 是降水入渗过程中不同累计时间点的湿润峰位置,试验结束时浸润峰深度距坡顶约 120 cm,距坡面垂直距离约 70 cm。坡面的降水入渗速率在整个过程中小于坡顶的,原因是降水在坡面停留时间较短,迅速形成表面径流流失。

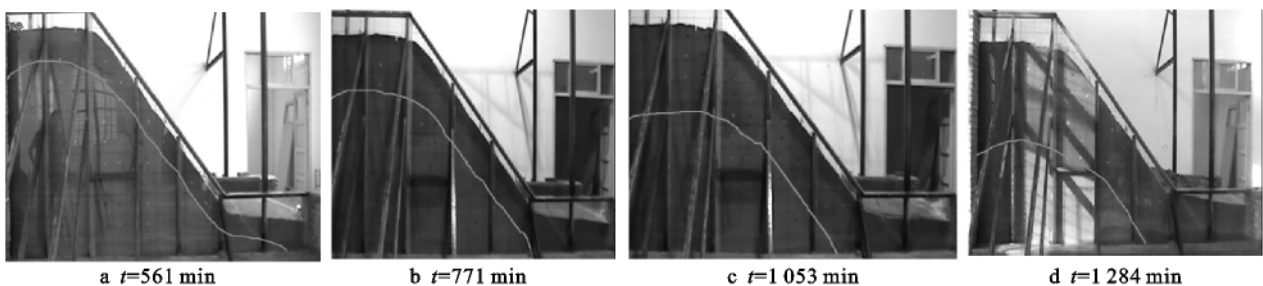


图 3 降雨过程中坡体降水入渗情况

不同位置体积含水率随时间的变化趋势如图 4 所示,对照水分传感器位置分析可知,试验初期靠近坡顶和坡面的位置含水率迅速增大,远离坡顶和坡面

的位置则需一段时间才开始增大或者一直不变,其中最下一层最靠近后缘的 2 个传感器 1—1 和 1—2 输出值一直恒定。水分增大到一定值后趋于平稳,标志

着该位置土体含水率达到峰值,近似饱和。至第 1 284 min 降雨停止,发生大规模坡面崩滑时土体内部最大体积含水率达到 44%,此时土体含水率最大,几近饱和。

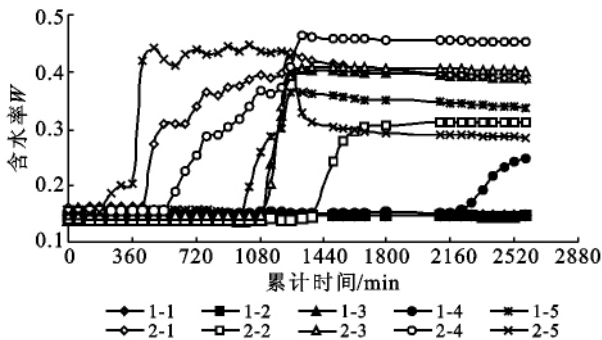


图 4 土体内部不同位置体积含水率随时间变化趋势

降水入渗通过改变孔隙水压力破坏土体的稳定性。干燥时土体具有很高的基质吸力,可以提高土体的抗剪强度,当大量雨水渗入时土体含水量增加,使基质吸力减小,基质吸力提供的额外抗剪强度减小,以致土坡发生滑动。另外,当坡顶出现拉裂缝后,雨水顺着裂缝渗入,达到一定深度后因没有可以继续渗

入的裂隙,已渗入的雨水会形成滞水,原本非饱和的土体逐渐饱和软化,土体有效应力降低,从而导致强度降低。降水入渗使土壤颗粒间形成结合水膜并且不断增大,土粒间原有的胶结作用削弱,凝聚强度降低,结构性被破坏进而导致整体性破坏。水膜的楔入又对土体颗粒之间的摩擦起到了润滑作用,使土颗粒之间的相互移动更加容易。综上所述,降雨入渗(外因)通过结构性变化(内因)起作用,最终使模拟的黄土边坡发生崩滑。

2.2 位移及裂缝

裂缝的产生是模型最终发生滑坡的关键。图 5 表示从左往右依次是坡顶、坡顶下方、坡面下方的裂缝。降水不断入渗,使坡体浅层首先达到饱和并逐渐往下发展,水分的润滑作用加速了土体抗剪强度的弱化,最终因抗剪强度小于剪切应力而发生变形,使得其后缘处于拉应力状态而形成了贯通的裂缝,裂缝为降雨的进一步渗入提供了条件,同时,坡体的蠕动变形使得拉裂向下逐渐加深。坡面下方的降水入渗速率在整个过程中小于坡顶的,坡面下方的裂缝发展不如坡顶下方明显,如图 5c 所示,坡面下方只有一些平行的微小竖向裂缝。

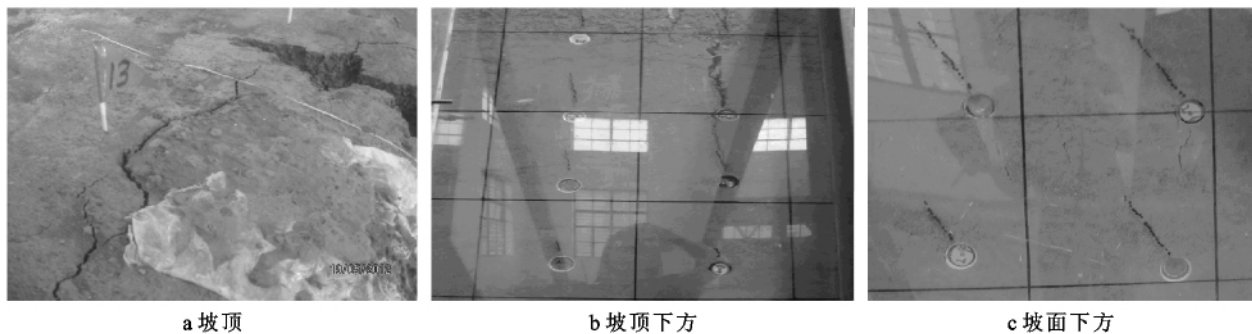


图 5 不同位置的裂缝及示踪点标记的位移

降水入渗过程使土粒产生向下渗透力的作用,增大了土体的下滑力,加之土体自身不断的蠕变,坡体有逐渐发展增大的位移,由图 5b, 5c 记号笔标记可知坡顶下方位移竖直向下,自上而下位移逐渐减小,最大位移约 10 cm。坡面下方位移方向与水平的夹角略大于 45°,最大值约 15 cm。降水入渗使黄土产生湿陷从而产生竖向位移。坡顶表层在降雨条件下达到暂态饱和,抗拉应力减小,受到拉应力后出现拉裂缝而向前运动或有向前运动的趋势,进而产生水平方向的位移。

2.3 坡面形态变化

降雨及其产生的径流是引起黄土高原土壤侵蚀的主要动力:雨滴具有一定的动能,直接打击地表可

使土粒飞溅和沿坡面迁移;破坏土体结构,分散土体成颗粒,造成坡面表层孔隙减少或阻塞,导致渗透性下降,利于地表径流形成和流动;形成的表面径流对坡面产生剪切剥蚀,当水流剪切力大于土壤临界剪切力时土壤颗粒被剥蚀。雨滴击溅使地表薄层径流紊乱,导致了侵蚀力增强。

试验过程中不同累计时间点的坡面形态如图 6 坡面左侧所示:坡面侵蚀经历了由“片蚀—沟蚀—沟间坡面面蚀向深切和侧蚀发展”的过程,坡面形态的变化由入渗、产流、产沙引发。

降雨初期,裸坡坡面受到雨滴击溅,松散颗粒运移使得坡体孔隙减少或者阻塞,则会导致渗透性下降,从而表面形成较薄的径流层,薄层径流对坡面侵

蚀作用有限,以对雨滴溅蚀产生的松散土粒的搬运输移为主。降雨持续,入渗和产流趋于稳定,坡面形成浅短的细沟,局部发育形成冲蚀沟,此时沟蚀作用加

强,侵蚀向深切和侧蚀发展,冲蚀沟逐渐加深加宽,最终沟岸出现崩塌现象。坡面因受侵蚀呈整体下降趋势。

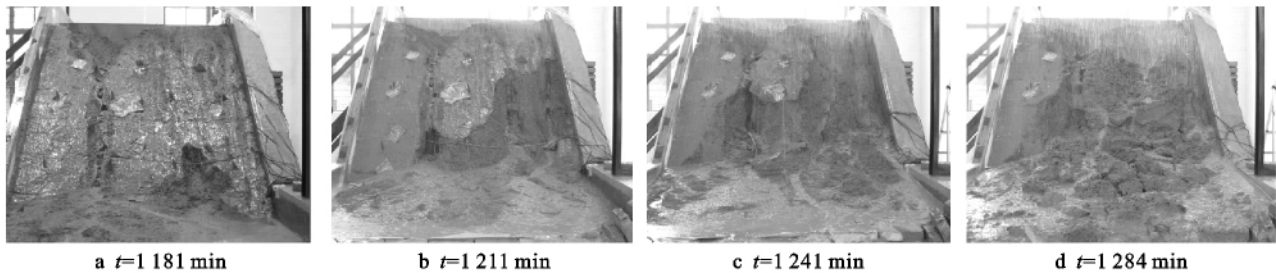


图 6 滑坡的发生发展过程

2.4 坡面崩滑的发展

随着降雨的持续,坡体不同位置产生一系列裂缝,最后一次降雨 1 h 后坡脚出现浅层滑动现象,并逐渐发展出现滑塌,如图 6 坡面右侧所示。降水的入渗作用在于减弱土体的抗剪强度并加大其下滑力,当抗滑力小于下滑力,剪切应力大于抗剪强度,土体开始出现拉裂缝,加速降水进一步入渗。降水的持续入渗导致模型浅层土体逐渐饱和,而坡脚由于不断有表面径流经过其饱和程度较高,所以最先出现轻微流滑现象。已经滑塌的位置形成临空面,土体具有自重下滑力,加之一直降雨及表面径流持续经过发生流滑位置,小型流滑逐渐发展,最后演变为坡面崩滑。由于降雨过程滑塌自下而上发展,土体的坡面崩滑位置逐渐向上推移。

3 结论

(1) 降水入渗由快到慢,径流量和入渗量的比值随着时间的推移基本呈先增长再减小最后稳定的趋势。坡顶的降水入渗速率始终大于坡面的。

(2) 降雨过程中坡顶首先产生贯通的拉裂缝,降水进一步入渗后坡体内部产生局部微小竖向裂缝。坡体位移方向:坡顶下方竖直向下,最大位移约 10 cm,坡面下方位移方向与水平夹角略大于 45° ,最大值约 15 cm。

(3) 随着降雨持续,坡面侵蚀经历了“片蚀—沟蚀—沟间坡面面蚀向深切和侧蚀发展”的过程,形成了较大的冲蚀沟,最终沟岸发生崩塌。坡面因受侵蚀呈整体下降趋势。

(4) 降雨使得坡趾处土体饱和程度较高,小滑塌自下而上发展,坡面崩滑位置逐渐向上推移,最终发

生较大坡面崩滑。

降雨是引起黄土坡面侵蚀和坡体滑坡的重要因素,应遵循“治坡先治水”的原则^[12],一方面可通过增加植被等防止降雨对坡面造成严重冲蚀;另一方面可采取截水沟、排水沟等排水措施控制过多降水入渗到坡体内部。

[参 考 文 献]

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科技出版社,1997:1-2.
- [2] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000:10-18.
- [3] 刘旦旦,王健,尹武君. 天然降雨对黄土坡地土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. 节水灌溉,2011(8):17-20.
- [4] 雷祥义,魏青珂. 陕北伤亡性黄土崩塌成因与对策研究[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):64-69.
- [5] 雷祥义. 陕北陇东黄土孔隙分布特征[J]. 科学通报,1985,30(3):206-209.
- [6] Ochiai H, Okaday Y, Furuyag G, et al. Fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. Landslides, 2004,1(3):211-219.
- [7] 张敏,吴宏伟. 边坡模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学,2007,28(S):53-57.
- [8] 沈波,郑南翔. 路基压实黄土坡面降雨冲蚀实验研究[J]. 重庆交通学院学报,2003,22(4):64-67.
- [9] 谢妮,王钊. 黄土路基边坡降雨响应的实验研究[J]. 四川大学学报,2009,41(4):31-36.
- [10] 林鸿洲,于玉贞. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩土力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
- [11] 贾官伟,詹良通. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩土力学与工程学报,2009,28(9):1798-1803.
- [12] 罗丽娟,赵法锁. 滑坡防治工程措施研究现状与应用综述[J]. 自然灾害学报,2009,18(4):158-164.