

降雨边坡试验研究进展及关键问题

李荣建^{1*}, 白维仕¹, 王治军², 潘俊义², 孙萍³, 霍旭挺¹

1. 西安理工大学岩土工程研究所, 西安 710048
2. 西安长庆科技工程有限责任公司, 西安 710021
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要 滑坡的产生与降雨有着密切联系, 雨水入渗不仅可以改变边坡土体的水分分布, 而且可以导致土体强度大大降低, 从而可能成为触发边坡失稳破坏的主要因素。针对降雨入渗作用下的边坡稳定性, 基于对近年来国内外降雨边坡试验研究成果的梳理总结, 分析了降雨条件下滑坡的成因机制, 着重分析了降雨入渗作用下的室内边坡模型试验和现场边坡试验的研究思路、试验方法及试验技术, 探讨了目前室内降雨边坡模型试验与现场降雨边坡试验的优点及其不足之处, 以及进一步发展需要解决的关键问题。

关键词 降雨边坡; 现场试验; 室内模型试验; 人工模拟降雨装置

中国是滑坡灾害最严重的国家之一, 降雨作用是导致和诱发滑坡的主要因素^[1-3], 根据“中国地质灾害数据库”的记录显示, 发生的滑坡灾害中有 68.5% 是由降雨作用引起的^[4]。目前降雨边坡稳定性评价的主要方法是极限平衡法^[5-6]和有限单元法^[7]。针对降雨作用对边坡影响的研究除借助数值模拟方法外, 通常采用室内边坡模型试验和现场边坡试验等方法。岩土工程模型试验的类型分为普通 1g 模型试验、足尺模型试验和离心模型试验^[8-9]。降雨边坡模型试验的类型亦分为相应的普通 1g 模型试验、足尺模型试验和离心模型试验, 普通 1g 模型试验包括降雨入渗作用下的静力模型试验、爆炸动力模型试验和振动动力模型试验; 足尺模型试验包括降雨入渗作用下的静力原型试验和动力激振原型试验; 离心模型试验包括降雨入渗作用下的静力离心模型试验和动力离心模型试验。其中, 足尺模型

试验由于成本太高且受边界条件限制很难得到理想的全过程力学响应, 其研究成果相对较少; 普通 1g 模型试验和离心模型试验的研究已经取得了较多的成果, 但仍然存在问题需要进一步研究完善。本文通过梳理总结近年来国内外关于降雨边坡试验的研究成果, 分析探讨室内降雨边坡模型试验与现场降雨边坡试验的优点及其存在的关键问题和未来发展方向, 为进一步深入研究提供参考。

1 降雨诱发滑坡成因机制

为了探索降雨诱发滑坡的成因机制, 很多学者开展了相应的试验和理论研究。李峰等^[10]从非饱和土的吸力衰减、强度软化、地下水位升降及坡面冲刷等方面研究了降雨诱发边坡失稳的作用机理。王继华^[11]对土

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2019-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472296); 西安长庆科技工程有限责任公司项目(CTEC(2016)Z-KY-003); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(14JS064); 中国地质调查项目(DD20190717)

作者简介: 李荣建(通信作者), 教授, 研究方向为黄土力学、岩土工程抗震及边坡工程等, 电子信箱: lirongjian@xaut.edu.cn

引用格式: 李荣建, 白维仕, 王治军, 等. 降雨边坡试验研究进展及关键问题[J], 科技导报, 2019, 37(14): 59-65; doi: 3981/j.issn.1000-7857.2019.14.008

坡降雨入渗模式进行评价,分析了影响土坡降雨入渗的主要因素。吴仁铤^[12]以典型灾害滑坡为例,分析了各种因素综合作用触发滑坡的机制。宋朋燃^[13]通过黄土边坡冲刷室内模型试验装置对边坡坡面冲刷进行模拟还原,总结了黄土边坡坡面冲刷破坏的影响因素。

以上研究均对降雨诱发滑坡的成因机制进行了研究,通过分析可得降雨诱发滑坡的成因主要有:第一,降雨使得边坡土体水分不断增加,孔隙水压力逐渐增大,导致边坡土体的基质吸力逐步降低乃至丧失;第二,降雨入渗使得边坡土体的水分增大,导致边坡土体产生一定软化,表现为边坡土体强度大幅下降;第三,降雨补给地下水或地下水位上升使得边坡土体颗粒间的可溶性胶结物质流失,边坡土体颗粒间的黏结强度和内摩擦系数下降,导致边坡土体的抗剪强度减小;第四,降雨强度大于入渗强度时,雨水冲刷边坡表面土体,使得边坡表面土体发生破坏——起初对边坡表面土体发生局部冲蚀,然后发生全面冲蚀,最终导致边坡失稳,引发滑坡。因此,一般条件下降雨入渗诱发滑坡可以概括为以上因素作用及其耦合作用的结果。

2 室内降雨边坡模型试验研究

2.1 普通 1g 室内降雨边坡模型试验研究

为深入了解降雨诱发滑坡失稳的破坏机理和演化特征,很多学者开展了普通 1g 室内降雨边坡模型试验及理论研究。林鸿州^[14]对粉土边坡进行降雨模拟模型试验,建立降雨诱发边坡失稳的模型,探讨了降雨特性对边坡失稳的影响。武彩萍等^[15]以杨凌地区黄土为研究对象,进行人工降雨作用下黄土滑坡的室内模型试验,分析了降雨过程中水分入渗对黄土滑坡的影响。李海亮等^[16]开展双层降雨边坡模型试验,研究了降雨入渗对非均质土坡稳定性的影响。以上研究均通过在框架模型槽内制作边坡模型,进行多组有针对性的对比试验,深入分析了降雨入渗作用下边坡土体中各参数的变化规律,为普通 1g 室内降雨边坡模型试验的研究奠定了基础。

在普通 1g 室内降雨边坡模型试验的研究过程中,针对试验中边坡变形监测难度大以及降雨实现方式等问题,很多学者建立了降雨作用下边坡的变形监测系统,并研制了各种人工模拟降雨装置。

在降雨作用下边坡的变形监测方面,李焕强等^[17]将

光纤传感技术应用于边坡模型试验,该技术能有效解决边坡模型变形监测困难问题。李龙起等^[18]基于光纤光栅监测技术,研究了降雨作用对边坡坡体内部力学响应特征的影响。胡修文等^[19]基于直接线性变换理论和两摄站同步摄影方法,研究了普通数码相机在滑坡模型试验中变形和位移监测的可靠性。以上研究均采用不同的位移监测技术,监测了不同降雨条件下坡体的变形,并总结了边坡的变形规律,同时上述研究均采用非接触式监测方式,相比较于传统边坡变形监测方法通过在坡体中埋设传感器监测坡体变形的方式,保持了边坡模型的整体完整性,不改变模型内部的应力应变场,使模型的测试更加接近实际。

人工模拟降雨装置的研制是近年来普通 1g 室内降雨边坡模型试验的研究热点之一。李焕强等^[17]在边坡模型试验中使用的人工模拟降雨装置的降雨主体是由 $\Phi 20$ mm 的 PPR 承压管并排焊接构成,间隔 20 cm,承压管上每 10 cm 分布有 1 mm 小孔,供水系统由自来水管和增压泵共同组成。针对室内降雨边坡模型试验中大暴雨的模拟,徐向舟等^[20]研制了一套 SX2002 管网式降雨模拟系统,该人工降雨模拟装置的降雨强度的大小可根据试验要求在 1.0~4.0 mm/min 之间任选。罗先启等^[21]在滑坡模型试验研究中使用了叠加喷洒式人工降雨控制系统,该系统由供水系统、控制器和上位机及软件组成,并通过电气控制部件(电磁阀)执行降雨强度的转换控制。

目前,普通 1g 室内降雨边坡模型试验所使用的人工模拟降雨装置大多为管网式降雨装置,一般通过降雨喷头间的不同组合、调节水泵压力等方法来调节降雨强度。然而,该类型人工模拟降雨装置往往具有降雨均匀度不良、输出水压可控性弱而导致喷头供水压力与流速不稳定、降雨强度不易调控、小雨中雨雨强难以真实再现实际雨强等问题。因此,进一步优化普通 1g 室内降雨边坡模型试验的人工模拟降雨系统,是室内边坡模型试验的一个发展趋势。

2.2 边坡离心模型试验研究

很多学者基于不同的方法探讨了降雨强度、降雨持时等对边坡稳定性的影响,这些研究大大推动了边坡离心模型试验的发展。徐光明等^[22]基于不同坡度的膨胀土开挖边坡土工离心模型试验,比较了边坡坡度大小对其稳定性的影响。姚裕春等^[23]、唐茂颖等^[24]通过改变边坡坡角角度、边坡模型土体高度和边坡模型土

体含水率,开展了降雨入渗条件下边坡离心模型试验研究。陈生水等^[25]针对膨胀土边坡进行边坡离心模型试验,开展了边坡长期强度变形特性和稳定性的研究。Timpong等^[26]通过开展人工模拟降雨条件下的边坡离心模型试验,系统地研究了降雨入渗作用下边坡土体内部的渗流变化规律。以上研究均着重于边坡离心模型试验技术的改进以及试验结果的分析、完善等方面,并没有考虑模型边界效应的影响。

模型边界效应是指,模型所处试验装置对其试验结果产生的偏离实际规律的影响。为了进一步探讨模型边界效应对试验结果的影响,国内外学者进行了相应的研究。刘东燕等^[27]通过自制的新型试验装置进行不同边界的边坡模型变形破坏研究,探讨边坡模型破坏开始时的坡角与边界条件的关系。姚燕明等^[28]通过对模型土进行加卸载离心模型试验,分析了边界摩擦力对土体变形的影响。Malushitsky^[29]通过观测滑动破坏模型的水平截面图,研究了模型箱宽度对土体滑动面的影响。Santamarina等^[30]研究发现,在模型箱内壁涂以硅脂并粘贴塑料薄膜能够在一定程度上减小侧壁边界效应。

以上研究为边坡离心模型试验中边界条件的处理奠定了基础,但其研究的模型边界效应的影响因素过于单一,因此进一步开展边坡模型边界效应对边坡离心模型试验结果的影响的研究是很有必要的,同时如何减小甚至消除模型边界效应也是未来的研究方向。

针对边坡离心模型试验中的降雨实现方式,最初国内外很多学者根据实测降雨资料及其引发的滑坡间的关系寻求降雨条件下的滑坡机制,而较少采用离心模型试验的方法,这是因为在离心场中模拟降雨难度大且不易实现。为此,部分学者开展了降雨边坡离心模型试验研究。徐光明等^[22]通过控制注水浸泡时间来模拟短期和长期的雨水入渗,姚裕春等^[23]通过改变制样时土体含水率来代替不同规模的降雨。然而以上边坡离心模型试验的降雨实现方式均不能真实模拟实际自然降雨过程,尤其是不能模拟雨水入渗坡体的过程。

针对上述问题,钱纪芸等^[31]通过自行研制的离心场降雨模拟设备,开展降雨条件下边坡的离心模型试验,研究了降雨对黏性土边坡变形破坏的影响。张敏等^[32]考虑了雨滴的尺寸效应和科氏加速度引起的雨滴偏移,自主设计了一套降雨模拟系统,对边坡离心模型试验中的人工模拟降雨装置进行了完善,通过开展降雨

条件下砂土边坡的离心模型试验,系统地分析了降雨入渗对边坡稳定性的影响。

然而现有的边坡离心模型试验中的人工模拟降雨系统并不完善,主要体现在离心降雨设备复杂,存在雨滴粒径过大、雨滴击溅速度超过实际、降雨均匀度调控较差等问题。因此,针对以上问题进一步完善人工模拟降雨设备,也是未来边坡离心模型试验的研究方向。

3 降雨入渗作用下现场边坡试验研究

3.1 现场边坡试验人工模拟降雨装置研究

李爱国等^[33]利用自然边坡场地,借助自然降雨测定降雨后边坡坡顶土体的含水率和基质吸力,分析了边坡土体的渗流状态。张友谊^[34]应用渗流理论,借助自然降雨,通过对峡口边坡进行现场监测,系统地研究了降雨对峡口边坡稳定性的影响。以上研究均是在自然降雨条件下开展的边坡现场模型试验,但自然降雨受天气因素影响较大,降雨强度、降雨持时均不可控制且耗时、耗力。因此,借助自然降雨进行边坡现场模型试验的研究,往往不能准确地分析降雨入渗作用下边坡的失稳机理。

针对边坡现场降雨模型试验中自然降雨存在的问题,众多学者开展大量试验及理论研究,研制了人工模拟降雨装置^[35-37],可等效模拟自然降雨,现已成为边坡现场降雨模型试验的重要手段之一。

陈文亮等^[38]研制的SR型野外人工模拟降雨装置,由降雨喷头、降雨支座、驱动机构、供水机构和动力系统组成,是一种多喷头、多单元组合的间歇式降雨装置。周中等^[39]参照SR型野外人工模拟降雨装置,自行研制了一种人工模拟降雨装置,由水泵、水表、控制阀、水压表、喷头、主管、支管、二通管、三通管及四通管组成,通过调节控制阀可以产生多级降雨强度。谢妮等^[40]为研究黄土路基边坡的降雨响应,自行研制了一种人工模拟降雨装置,主要由喷头、流量表、输水管道、水泵、固定脚手架等组成。上述研究中所采用的人工模拟降雨装置均采用管网降雨方式,具有结构简单、易安装拆卸、适用于野外工作等特点,但其降雨强度不易控制,前期降雨不稳定,且大多采取间歇式降雨方式来模拟自然降雨,不适宜进行小雨量的降雨模拟试验,同时在模拟降雨结束后,人工模拟降雨装置的管路中会残留有水且不易排出,导致实际降雨量偏小,对试验结果

造成影响。

中国科学院水利部水土保持研究所研制了一种组合侧喷式野外人工模拟降雨装置^[41],其供水压力由压力表控制,通过孔板的孔径来调节降雨强度,使得降雨雨滴终点速度近似天然降雨的速度。该装置为侧喷式降雨方式,组装灵活,能够较好地克服测试边坡上下地势高差大、模拟降雨范围大等困难,这是管网式降雨装置所不能比拟的。然而这种装置的降雨均匀度远不如管网式降雨装置好,且模拟的降雨强度下限值太高,通常只能模拟大雨或暴雨。

通过以上分析可知,目前已有大量的针对人工模拟降雨装置的研究,人工模拟降雨系统逐渐完善,降雨模拟情况也越接近于自然降雨。但人工模拟降雨装置仍存在降雨强度不易调控,不利于模拟自然状态全天连续降雨,以及模拟降雨时降雨均匀度差、小雨中雨雨强难于真实再现实际雨强等问题,因此人工模拟降雨装置仍需要进一步完善。

3.2 现场降雨边坡试验研究

Rahadjo 等^[42]、Tsaparas 等^[43]通过对天然残积土坡进行长期的现场监测和人工模拟降雨试验,系统地研究了人工模拟降雨和天然降雨条件下土坡的孔隙水压力、含水量以及入渗量的变化。詹良通等^[44]对非饱和膨胀土挖方边坡进行了人工模拟降雨试验和原位综合监测,通过对边坡模型土体中的水分、孔隙水压力、应力状态以及土体变形的监测,探讨了边坡中土-水相互作用机理。谢妮等^[40]选取某段路基边坡,采用自制的人工模拟降雨设备进行了现场降雨模型试验,研究了非饱和压实黄土路基边坡在降雨入渗作用下的孔隙水压力、含水率响应以及坡体变形响应。

以上现场降雨边坡试验主要研究了均质边坡在降雨入渗作用下的含水量、孔隙水压力、坡体变形、基质吸力和土体强度的变化规律。但是,由于现场边坡土体的特殊性和复杂性,很难找到土质完全一致的试验场地进行降雨入渗边坡试验。针对非均质边坡的降雨现场试验较少这一问题,周中等^[39]选取某土石混合体边坡进行人工降雨模拟试验并进行现场监测,系统地研究了降雨入渗诱发堆积层滑坡的失稳机理,以及边坡性状随时间变化的特性。李汝成等^[45]选取某泥岩-土混填路堤边坡进行人工降雨模拟试验,对边坡的孔隙水压力、土压力和变形进行监测,探讨降雨入渗对路堤边坡稳定性的影响,揭示了降雨对泥岩-土混填路堤边坡

稳定影响的变化规律。

显然非均质边坡与均质边坡在降雨条件下的入渗规律是不同的,因此选择具有典型意义的非均质边坡进行降雨监测,观测边坡在降雨作用下的物理力学特性变化规律,对研究降雨入渗作用下非均质边坡稳定性具有重要的意义,这是未来现场降雨边坡试验的发展方向之一。

在野外边坡选取试验场地并安装降雨装置进行降雨边坡试验时,测试边坡是选取于自然边坡之局部,同时人工降雨实施范围也是局部,因此局部人工降雨必然导致待测边坡的局部三维效应,即一方面降雨入渗过程中雨水会从测试边坡内部入渗至外部引起侧向散失,使得测试边坡的入渗响应失真,结果偏于保守;另一方面会导致测试边坡与自然边坡之间变形存在锚固作用,使得测试边坡的变形响应失真。这些因素对于研究边坡的降雨效果、入渗特性、坡体变形以及可能的滑坡失稳是不可忽略的。因此,在现场降雨边坡试验中,设置合理的侧向边界条件,对于提高现场降雨边坡试验的可靠性具有重要的实际意义,这也是现场降雨边坡试验研究的一个发展方向。

4 结论

针对降雨入渗边坡的研究已经有很多,其中包括理论分析、室内降雨边坡模型试验以及现场降雨边坡试验等方面的研究成果,这些成果大大推动了降雨入渗边坡试验和理论的发展,但仍然需要从以下4个方面进行深入研究。

1) 受当前试验技术、试验条件的影响,现有室内降雨边坡模型试验及现场降雨边坡试验的测试技术并不成熟,传统的接触式监测方式存在扰动问题。由于非接触式监测方式可以有效保护边坡模型的完整性,使得模型相似更加精确,因此大力发展非接触式监测方式是必要的。

2) 现场降雨边坡试验的研究主要针对均质边坡,而自然界中的边坡大多是非均质边坡和植被覆盖边坡,为了更符合实际情况,开展相应边坡的降雨研究具有新的意义。

3) 人工模拟降雨设备存在降雨强度不易调控,不利于模拟自然状态全天连续降雨,模拟降雨的降雨均匀度差,以及小雨中雨雨强难以真实再现实际雨强等

缺陷,因此人工模拟降雨装置需要进一步完善。

4) 现场降雨边坡试验中,由于待测边坡客观存在局部三维效应,使得测试边坡的变形响应失真,因此进一步研究设置合理的侧向边界条件对于提高现场降雨边坡试验的可靠性具有十分重要的实际意义。

参考文献(References)

- [1] 林孝松. 滑坡与降雨研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 1-7.
Lin Xiaosong. The study of landslide related to rainfall[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2001, 12(3): 1-7.
- [2] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Sun Guangzhong. Landslides in China—selected[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [3] 钟立勋. 中国重大地质灾害实例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 1-10.
Zhong Lixun. Case study on significant geo-hazards in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(3): 1-10.
- [4] 戚国庆. 降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.
Qi Guoqing. Study on the mechanics of rainfall-induced landslide and its evaluating method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [5] 张常亮, 李同录, 李萍. 三维极限平衡法通用形式的建立及应用[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 98-105.
Zhang Changliang, Li Tonglu, Li Ping. Constitution and application of three-dimensional limit equilibrium general form[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(1): 98-105.
- [6] 袁恒, 罗先启, 张振华. 边坡稳定分析三维极限平衡条柱间力的讨论[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2453-2458.
Yuan Heng, Luo Xianqi, Zhang Zhenhua. Discussion on force between columns of three-dimensional limit equilibrium for slope stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2453-2458.
- [7] 秦卫星, 陈胜宏, 陈士军. 有限单元法分析边坡稳定的若干问题研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 586-590.
Qin Weixing, Chen Shenghong, Chen Shijun. A study on some issues for slope stability analysis by finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 586-590.
- [8] 李荣建, 闫蕊, 刘军定, 等. 土工动力离心模型试验中物理破坏模拟比较及关键问题[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 718-726.
Li Rongjian, Yan Rui, Liu Junding, et al. A comparison of dynamic response and failure simulations in geotechnical dynamic centrifugal model tests and the key issues[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 718-726.
- [9] 李荣建, 郑文. 岩土工程模型试验方法发展与应用的的方法论探讨[C/OL]. 2011 International Conference on Economic, Education and Management (ICEEM 2011), Macau, China, March 5-6, 2011. [2018-08-19]. http://kns.cnki.net/kns/brief/default_result.aspx.
Li Rongjian, Zheng Wen. Discussion on the methodology of development and application of geotechnical modeling test[C/OL]. 2011 International Conference on Economic, Education and Management (ICEEM 2011), Macau, China, March 5-6, 2011. [2018-08-19]. http://kns.cnki.net/kns/brief/default_result.aspx.
- [10] 李峰, 郭院成. 降雨入渗对边坡稳定性作用机理分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(6): 44-45, 48.
Li Feng, Guo Yuancheng. Mechanism analysis of rainfall infiltration on slope stability[J]. Yellow River. 2007, 29(6): 44-45, 48.
- [11] 王继华. 降雨入渗条件下土坡水土作用机理及其稳定性分析与预测预报研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
Wang Jihua. Research the principle of water-soil interaction in soil-slope and analyze and predict its stability in condition of rain infiltration[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [12] 吴仁铤. 降雨诱发的滑坡作用机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Wu Renxian. Research on landslides mechanism induced by rainfall[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] 宋朋燃. 黄土边坡冲刷破坏特征及数值模拟[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
Sun Pengran. The erosion damage characteristics and numerical simulation of loess slope[D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [14] 林鸿州. 降雨诱发土质边坡失稳的试验与数值分析研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Lin Hongzhou. The study on the mechanism and numerical analysis of rainfall-induced soil slope failure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [15] 武彩萍, 骆亚生, 陈伟, 等. 降雨对黄土裸坡坡面形态影响的室内模型试验[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 115-119.
Wu Caiping, Luo Yasheng, Chen Wei, et al. Indoor model experiment for rainfall effects on bare loess slope shape[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 115-119.
- [16] 李海亮, 吴礼舟, 黄润秋, 等. 降雨条件下双层土坡的模型实验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 102-107.
Li Hailiang, Wu Lizhou, Huang Runqiu, et al. Physical model tests of two-layer soil slopes under rainfall[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(10): 102-107.

- [17] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1703-1708.
Li Huanqiang, Sun Hongyue, Liu Yongli, et al. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1703-1708.
- [18] 李龙起, 罗书学, 王运超, 等. 不同降雨条件下顺层边坡力学响应模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 755-762.
Li Longqi, Luo Shuxue, Wang Yunchao, et al. Model tests for mechanical response of bedding rock slope under different rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 755-762.
- [19] 胡修文, 唐辉明, 李建松. 基于普通数码相机滑坡物理模型监测可靠性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1223-1226.
Hu Xiwen, Tang Huiming, Li Jiansong. Reliability study of landslide physical model monitoring based on non-metric digital camera[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1223-1226.
- [20] 徐向舟, 张红武, 董占地, 等. SX2002管网式降雨模拟装置的试验研究[J]. 中国水土保持, 2006(4): 8-11.
Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu, Dong Zhandi, et al. Experimental study on SX2002 pipe network-type precipitation simulation apparatus[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(4): 8-11.
- [21] 罗先启, 刘德富, 吴剑. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2476-2483.
Luo Xianqi, Liu Defu, Wu Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2476-2483.
- [22] 徐光明, 王国利, 顾行文, 等. 雨水入渗与膨胀性土边坡稳定性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 2(2): 270-273.
Xu Guangming, Wang Guoli, Gu Xingwen, et al. Centrifuge modeling for instability of excavated slope in expansive soil due to water infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 2(2): 270-273.
- [23] 姚裕春, 姚令侃, 袁碧玉. 降雨条件下边坡破坏机理离心模型研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 64-68.
Yao Yuchun, Yao Lingkan, Yuan Biyu. Analysis of a centrifugal model of slope damage mechanism during rainfall[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 64-68.
- [24] 唐茂颖, 罗强, 华政辉. 含水量对土质路堑高边坡变形特性影响的离心模型研究[J]. 路基工程, 2006(1): 59-62.
Tang Maoying, Luo Qiang, Hua Zhenghui. Centrifugal model experimental study on the influence of moisture content on deformation in high cutting slope of soil[J]. Subgrade Engineering, 2006(1): 59-62.
- [25] 陈生水, 郑澄锋, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 795-799.
Chen Shengshui, Zheng Chengfeng, Wang Guoli. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 795-799.
- [26] Timpong S, Itoh K, Toyosawa Y. Geotechnical centrifuge modelling of slope failure induced by ground water table change[J]. Landslides and Climate Chang, 2007: 107-112.
- [27] 刘东燕, 郑志明, 侯龙. 边坡模型边界效应及材料孔隙率敏感性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 23-27.
Liu Dongyan, Zheng Zhiming, Hou Long. Research on boundary condition effect and material porosity sensitivity for slope model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl1): 23-27.
- [28] 姚燕明, 周顺华, 李尧臣. 离心模型试验边界效应分析[J]. 力学季刊, 2004, 25(2): 291-296.
Yao Yanming, Zhou Shunhua, Li Yaochen. Boundary effect analysis of centrifuge test[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004, 25(2): 291-296.
- [29] Malushitsky Y N. The centrifuge model testing of wasteheap embankment[M]. London: Cambridge University Press, 1975: 5-11.
- [30] Santamarina J C, Goodings D J. Centrifuge modeling: A study of similarity[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, 12(2): 163-166.
- [31] 钱纪芸, 张嘎, 张建民, 等. 降雨时黏性土边坡的离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 829-833.
Qian Ji Yun, Zhang Ga, Zhang Jianmin, et al. Centrifuge model tests of cohesive soil slopes during rainfall[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 829-833.
- [32] 张敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 53-57.
Zhang Min, Wu Hongwei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Suppl1): 53-57.
- [33] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 278-282.
Li Aiguo, Yue Zhongqi, Tan Guohuan, et al. Soil moisture and suction measurement and its effect on slope stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 278-282.
- [34] 张友谊. 不同降雨条件下峡口滑坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Zhang Youyi. The steady of Xiakou landslide under the different rainfall conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [35] 陈文亮, 王占礼. 国内外人工模拟降雨装置综述[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 61-65.

- Chen Wenliang, Wang Zhanli. Summary on the installation of simulated rainfall at home and abroad[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1): 61-65.
- [36] 任树梅, 刘洪禄, 顾涛. 人工模拟降雨技术研究综述[J]. *中国农村水利水电*, 2003(3): 73-75.
- Ren Shumei, Liu Honglu, Gu Tao. Summary of research on artificial simulation of rainfall[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2003(3): 73-75.
- [37] 王洁, 胡少伟, 周跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(4): 188-190, 194.
- Wang Jie, Hu Shaowei, Zhou Yue. Application of artificial simulation of rainfall devices to soil and water conservation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(4): 188-190, 194.
- [38] 陈文亮, 唐克丽. SR型野外人工降雨模拟装置[J]. *水土保持研究*, 2000, 7(4): 106-110.
- Chen Wenliang, Tang Keli. A new SR style field artificial rainfall simulator[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000, 7(4): 106-110.
- [39] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1391-1396.
- Zhou Zhong, Fu Helin, Liu Baochen, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1391-1396.
- [40] 谢妮, 邹维列, 严秋荣, 等. 黄土路基边坡降雨响应的试验研究[J]. *四川大学学报*, 2009(4): 31-36.
- Xie Ni, Zou Weilie, Yan Qirong, et al. Experimental re-
- search on response of a loess subgrade slope to artificial rainfall[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009(4): 31-36.
- [41] 吴钦孝, 赵鸿雁, 韩冰. 黄土丘陵区草灌植被的减沙效益及其特征[J]. *草地学报*, 2003, 11(1): 23-26.
- Wu Qinxiao, Zhao Hongyan, Han Bing. Benefit and Characteristics of Grass-Shrub Vegetation for Reducing Soil Erosion in Loess Hilly Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(1): 23-26.
- [42] Rahardjo H, Lee T T, Leong E C, Rezaur R B. Response of a residual soil slope to rainfall[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42: 340-351.
- [43] Tsaparas I, Rahardjo H, Toll D G, et al. Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40: 1012-1032.
- [44] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 151-158.
- Zhan Liangtong, Wu Hongwei, Bao Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 151-158.
- [45] 李汝成, 王复明. 降雨入渗对泥岩-土混填路堤稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2260-2266.
- Li Rucheng, Wang Fuming. Effect of rainfall infiltration on stability of mudstone-soil mixture embankment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2260-2266.

Research progress and key problems of rainfall slope experiment

LI Rongjian^{1*}, BAI Weishi¹, WANG Zhijun², PAN Junyi², SUN Ping³, HUO Xuting¹

1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Xi'an Changqing Technology & Engineering Co., Ltd., Xi'an 710021, China

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract The occurrence of landslide is closely related to rainfall, which can not only change the water distribution of slope soil but also reduce the strength of soil, and may become the main factor to trigger the failure of slope. Aimed at slope stability analysis under rainfall infiltration, the mechanism of the landslide is analyzed based on the indoor slope rainfall model tests and the slope field rainfall tests, with focuses on rainfall condition, research ideas, test methods and test techniques of indoor slope model tests and slope field tests. The advantages and disadvantages of current indoor slope rainfall model tests and slope field rainfall tests are discussed, the key problems of the indoor slope rainfall model tests and slope field tests are addressed, and the future developments of the indoor slope rainfall model tests and slope field tests are prospected.

Keywords rainfall slope; field test; indoor model test; artificial rainfall device ●



(责任编辑 韩星明)