

文章编号: 1009-3850(2010)01-0098-05

中国滑坡降雨试验的研究现状与发展趋势

常晓军, 王德伟, 唐业旗

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 滑坡降雨试验是降雨型滑坡形成机理研究的重要方法之一。20 世纪 90 年代以来, 我国的工程地质学家对降雨型滑坡的关注与研究日益深入, 更加注重通过试验的方法研究降雨型滑坡。本文对我国的降雨型滑坡的研究现状与发展趋势进行了评述。

关键词: 滑坡降雨试验; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

1 前言

降雨型滑坡是一种发生频率高、分布范围广、破坏形式复杂的滑坡类型。降雨型滑坡的研究已成为国内外工程地质学界的研究热点。早在 20 世纪 70 年代, 美国、日本等国的专家和学者就开始通过人工降雨的方法研究降雨型滑坡的形成机理, 并在防灾减灾工作中取得了巨大的经济效益和社会效益。我国的研究起步较晚, 但经过数十年的学习和借鉴, 也取得了不少的研究成果。

20 世纪 90 年代以来, 我国学者更加注重通过试验的方法研究降雨型滑坡, 在工程实践应用、试验方法尝试、机理研究与理论探索等方面都得到了很大的进展, 提高了降雨滑坡灾害的预警水平, 为防灾减灾提供了更为准确的依据和参考。本文对我国降雨型滑坡的试验条件、研究现状等方面进行了论述, 并提出了今后的发展趋势。

1 降雨型滑坡的概念

降雨型滑坡目前在国内外尚无确切的定义。在我国的工程地质领域, 通常把以大气降水为主要诱发动力的滑坡(岩土体斜坡失稳现象)称为降

雨型滑坡。我国是地质灾害极为发育的国家之一, 近年来平均每年发生的滑坡灾害在 1 万起左右, 其中的 80% 以上发生在 5 月至 9 月的雨季^[1], 说明至少半数以上的滑坡灾害直接或间接的与降雨有关。据统计, 全国已经完成地质灾害调查的 290 个县(市)中, 共发育滑坡 2873 处, 占地质灾害总数的比例高达 51%。暴雨是已调查滑坡的主要诱发因素。

在我国, 降雨诱发的滑坡不仅数量巨大, 规模和危害也是极其惊人的。最近几十年来, 我国境内因降雨诱发了数以万计的灾害(难)性滑坡^[3], 其中比较有名的滑坡数十处, 这些滑坡的发生无一例外的给人民生命财产造成了极大的损失(表 1)。

大量的滑坡灾害事件让“降雨是诱发滑坡的主要因素”成为众多专家学者的共识^[2, 4~10]。近年来的滑坡降雨试验表明, 降水对斜坡体成灾是一个动态作用过程, 降雨诱发滑坡灾害的作用主要表现在以下几个方面^[4~19]: ①大气降水渗入潜在滑体, 增加岩土体的容重, 使岩土体软化, 抗滑力降低, 从而导致斜坡失稳; ②降雨期间或降雨之后, 斜坡岩土体内孔隙水压力的升高使得潜在滑动面上的有效应力及抗剪强度都降低; ③地下水位回落引起的岩土体的释水压密, 导致局部坡面沉降, 周围出现破裂面和

表 1 我国最近三十年来部分著名的降雨型滑坡
Table 1 Large scale rainfall induced landslides in China in the last decades

滑坡名称	地理位置	发生时间	规模 /m³	损失情况	资料来源
鸡扒子滑坡	重庆云阳	19820718	1500× 10 ⁴	长江航道中断 7天, 经济损失近 1 亿元	李玉生, 1984
新滩滑坡	湖北秭归	19850612	3000× 10 ⁴	即时搬迁	王尚庆, 1996
中阳村滑坡	重庆巫溪	19880110	765× 10 ⁴	死亡 33 人	满作武, 1991
铁西滑坡	四川喜德	19880902	4× 10 ⁴	颠覆列车	高建国, 1990
溪口滑坡	四川华蓥	19890710	100× 10 ⁴	死亡 221 人	欧正东, 1990
兰坪滑坡	云南	20000903	2000× 10 ⁴	搬迁 5000 人	徐世光, 2001
天台乡滑坡	四川宣汉	20040905	2500× 10 ⁴	1255 人搬迁, 形成 20 km 长的堰塞湖, 淹没农田、道路	黄润秋, 2005
岩门村滑坡	四川达县	20070707	1100× 10 ⁴	543 户 1831 人受灾, 直接经济损失约 1.5 亿	许强, 2007
大风滩滑坡	四川宣汉	20090716	120× 10 ⁴	37 户房屋全部摧毁	四川在线网, 20090717
小湾电站滑坡	云南凤庆	20090720	100× 10 ⁴	2 人死亡, 12 人失踪	人民网, 20090723

陡壁, 形成潜在崩滑的边界; ④降雨或洪水使地下水位抬升, 对岩土体产生较大的浮托力; ⑤当地下水位上升或坡体内存在相对隔水岩组时, 坡体会出现暂态饱和而产生渗透水流。

2 降雨型滑坡试验研究

降雨诱发滑坡的研究涉及气象学、渗透力学、水动力学、岩土力学、水文地球化学等多个学科, 人们通常通过概括出降雨型滑坡模型的方法开展针对性的研究工作。滑坡降雨试验就是探索这一问题的重要模型试验。

上世纪 50 年代后期, 我国开始研制、引进模拟降雨的装置。黄河水利委员会水利研究所、中科院西北水土保持研究所、中国科学院北京地理研究所和铁道科学研究院西南研究所等单位将人工模拟降雨的方法用于土壤侵蚀和径流观测等方面的试验研究。

20 世纪 80 年代, 中国科学院成都山地所创建山地灾害与地表过程重点实验室, 应用人工降雨侵蚀实验装置, 主要进行长江上游地区侵蚀产沙机理和山地灾害(泥石流)动力研究。20 世纪 90 年代初, 中国科学院水土保持研究所吸收了日本筑波国家防灾中心经验, 建立了人工降雨模拟大厅, 2000 年后经改建、扩建成为国内最大、世界上第二的大模拟降雨大厅, 该降雨大厅为我国土壤侵蚀与水土保持科学量化研究提供了平台^[21]。

21 世纪以来, 我国的降雨试验设施得到了空前的改善和发展。2002 年, 成都理工大学建立了降雨模拟试验室, 该实验室具有比较先进的降雨模拟试

验系统和计算机控制降雨量、孔隙水压力计算机自动采集等试验设备, 能够进行模拟天然降雨及各种蓄水水位变化条件下的工程或自然边坡的稳定性研究。2003 年, 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室设立了降雨试验研究室, 可开展包括野外实时监测与斜坡人工降雨试验和室内人工降雨模型试验研究。成都山地所于 2004 年研制了车载可变坡度的土壤侵蚀槽, 又独立配置一台专用供水车和独立的下喷式人工降雨器, 用于野外人工降雨侵蚀实验。随着我国社会经济的发展、科学技术的进步和国际交流合作的深入, 我国的滑坡降雨试验设备不断更新、试验条件得到不断改善, 实验室的数量也大大增加, 为广泛的深入研究不同区域的土壤侵蚀和滑坡形成的机理提供了便利。

3 我国滑坡降雨实验研究现状

3.1 现场滑坡降雨实验研究

20 世纪末, 我国的工程地质专家开始降雨试验的方法探索和降雨型滑坡机理研究。1999 年, 张家发等^[22]对三峡永久船闸高边坡全风化花岗岩山体开展了人工降雨实验研究, 首次通过对边坡工程进行降雨入渗的实验研究, 通过现场实验研究了暴雨条件下的入渗过程, 从而为研究降雨入渗条件下边坡山体渗流场及其排水系统的作用效果提供了基本资料。研究表明, 降雨入渗过程不能简单地用连续介质中的扩散过程来描述, 但在该实验尺度上进行全风化带的入渗能力研究是合适的。

进入 21 世纪, 随着我国降雨诱发的滑坡灾害的日趋严重, 更多的工程地质专家学者尝试通过试验

的方法以加深对降雨型滑坡的认识和理解,一些学者提出了降雨型滑坡机理的新观点。

胡明鉴等(2001, 2002)^[23, 24]选择蒋家沟流域一相对稳定的老滑坡体,通过人工降雨激发促使其二次滑动,观测滑坡滑移过程,分析描述实验过程中坡面出现的各种滑、溜、崩等现象,发现试验条件下有明显的滑坡与泥石流共生现象,认为松散砾石土斜坡是以降雨为主导因素的多种因素综合作用的结果。陈晓清等(2006)^[25]在蒋家沟上游泥石流形成源地的弯房子和下游泥石流堆积地的大凹子沟口分别进行了野外人工降雨条件下滑坡转化泥石流的原位试验,结果表明土体强度是土体颗粒级配、土体饱和度和土体渗透系数和土体张力的函数,并研究了强降雨作用下坡面植被及土体的颗粒级配对入渗的影响和坡面破坏规模等问题。魏丽等(2006, 2007)^[26, 27]针对暴雨型滑坡灾害预报预警服务的需要,建立了8个滑坡灾害监测点,通过对降水和滑坡稳定性的试验研究,对江西试验区进行了滑坡滑动临界降水量的初步确定,为滑坡灾害预报预警提供了科学的依据。

滑坡降雨试验作为科学探索的重要方法,在工程建设中也得到了工程地质专家们的认可,成为理论验证和方案设计的重要依据。出于工程安全的需要,一批工程地质专家对特定环境地质条件区的边坡进行了降雨试验研究以指导工程建设的实施。在湖北襄荆高速公路膨胀土堑坡试验段,谭等(2001, 2003)^[28, 29]开展了人工降雨诱发滑坡试验,利用极限平衡法进行了考虑水分入渗下的边坡稳定性分析。长江科学院包承纲教授与香港科技大学吴宏伟博士等合作(2003, 2004)^[14],在湖北枣阳一处11m高的典型膨胀土渠挖方边坡进行了人工降雨模拟试验和原位综合监测,通过对边坡土体中的水分、孔隙水压力、应力状态以及土体的变形监测,探讨了边坡中土水的相互作用机理,从而对降雨诱发的非饱和膨胀土边坡失稳机理取得进一步了解。包承纲^[29]对非饱和膨胀土边坡滑动的各种内在的和外界因素进行了分析,尤其对降雨入渗和裂隙影响进行了定量的分析。周中等(2006, 2008)^[15~17]选取上瑞高速公路贵州段典型堆积层边坡进行了人工降雨模拟试验,通过对边坡土体中的水分、孔隙水压力、应力状态、土体的变形以及地表位移的监测,分析降雨在堆积层边坡的入渗规律,探求边坡中岩土与水相互作用的机理,探明了堆积层边坡在降雨入渗影响下的滑动变形和不同降雨时程与雨强条件下降雨入渗

的特征,得出“降雨入渗的双重效应是降雨诱发堆积层边坡失稳的主要原因之一”的重要结论。在总结前人经验的基础上,谢妮等(2008)^[30]设计了重庆环城公路某段粉质粘土填方路堤上人工降雨试验和原位监测方案,该试验可为非饱和土坡的现场监测提供有价值的资料。为了寻求适合黄土地区公路路基湿陷性评价的方法,刘海松等^[31](2008)通过现场人工降雨试验,分析了湿陷性黄土降雨入渗的规律,结果表明:在降雨条件下,湿陷性黄土路基入渗的影响深度小于2.7m,饱和深度为20cm,该结果可为黄土地区路基处理设计中的黄土湿陷性评价与施工提供依据。

3.2 室内滑坡降雨实验研究

我国的地质学家于20世纪末开始尝试通过室内模拟降雨的方法研究滑坡,运用相似理论将重大的工程地质问题“搬进”实验室进行研究。1991年,宋克强等^[32]选取西安郊区白鹿原滑坡区的滑坡为原型制作了滑坡模型,通过在坡面均匀洒水的方式模拟降雨研究降水对黄土滑坡的影响,观测实验过程中滑坡模型不同部位在不同阶段的蠕变速率,计算实际大型黄土滑坡表面裂缝开展和地面形变总速率,结果表明临滑时的瞬时速率为23.5mm/d。旅美学者丁多文博士(1996)为了预测潘洛铁矿大格排土场边坡稳定性,开展了室内模型土坡的人工降雨试验^[33]。黄晏等(2003)^[34]通过降雨实验,研究诱发深层崩塌的地下水变化规律,得出了似乎与已有理论相悖的结论:在不饱和状态下,雨水也可以起到迅速补充地下水供给的作用。由于地形、地质条件的原因,当降雨结束后,在裂缝多的地区仍会存在地下径流增大的可能性。对于固体废弃物路堑边坡在降雨作用下的变形特征及破坏模式,朱宝龙等(2004)^[35]通过室内模拟将固体废弃物边坡在降雨作用下的变形过程分为5个阶段:起始阶段、快速增长阶段、减速增长阶段、缓速增长阶段和平缓阶段,并发现路堑边坡破坏方式有局部溜坍或滑塌、表面冲刷与整体下滑(滑坡)三种形式。黄润秋等(2005)^[3]根据天台乡滑坡的地质环境建立了地质模型,对宣汉天台乡滑坡进行了室内降雨和水压力的模拟试验,采取物理模拟的方法对天台乡滑坡的变形破坏机制进行验证。

针对三峡库区因降雨和蓄水引起的滑坡和库岸再造,成都理工大学和三峡大学分别设计了不同的模拟试验。2003年,成都理工大学地质灾害防治国家重点实验室完成了三峡库区塌岸预测物理模拟研

究,同时考虑蓄水与降雨分别进行了多因素和单因素的正交模拟实验,通过模拟试验区分了导致库区塌岸的主导因素和次要因素并对不同坡角和岩土结构的岸坡坍塌方式与塌岸宽度作了定量和半定量化的研究。2005年,三峡大学地质灾害实验室罗先启等^[33]根据三峡水库某高程水位的蓄水日志(李学贵,2003)及保持在该水位期间的降雨过程,模拟了干将坪滑坡在某时间段内滑坡的变形破坏过程,通过采集土压力、孔隙水压力和位移变化等试验观测数据,研究干将坪的形成机理与破坏模式,为三峡库区降雨和蓄水引起的滑坡研究提供了一个范例。

4 我国滑坡降雨试验的研究趋势

我国的滑坡降雨试验研究有以下趋势:

(1)广泛运用现代化科技手段,全方位测试岩土体斜坡对降雨的响应,定量化的研究降雨型滑坡机理。21世纪以来,随着科学技术的迅猛发展,越来越多的高科技手段被引入滑坡研究领域,使得多角度、全方位、定量化的研究降雨型滑坡成为可能。在试验过程中,不少的专家学者应用多种先进的监测、控制、测试系统或手段进行辅助滑坡降雨试验,实现了对试验的精确控制和试验数据的量化采集,为更深入、更准确、量化地研究降雨型滑坡奠定了基础。罗先启等^[33]在模拟干将坪滑坡的试验中,运用了包括人工降雨控制系统、大型滑坡试验平台起降控制系统、多物理量测试系统、非接触位移量测试系统、 γ 射线透射法水分测试系统等测试系统,自动精确采集斜坡位移、土体含水率、内部应变等试验数据并记录了斜坡变形过程,实现了对干将坪滑坡的量化研究。在自然滑坡的现场监测方面,加拿大地质调查局与中国地调局成都中心合作,运用固定式和滑动式钻孔倾斜仪、GPS和INSAR综合监测等技术手段,对丹巴甲居滑坡进行地表位移、降雨、滑坡深部位移、地下水等实施监测数量化监测。在受降雨和蓄水双重影响的三峡库区,彭轩明等^[36]采用大地测量和钻孔测斜等多种方法,对白家包和黄阳畔滑坡的地表和深部变形状况进行不连续观测,采用伸缩计对树坪和白家包滑坡进行连续观测,初步掌握了滑坡的变形演变趋势。

(2)模拟测试、自然现场监测与调查统计等方法相结合,缩短实验室研究与滑坡灾害预警之间的距离,将试验成果向实际应用的转化。尽管我国的工程地质学家们已经完成了一定数量的室内外的滑坡降雨实验,但存在试验的不可重复性和滑坡环境

的复杂性、有限数据测量的不可靠性。虽然试验中部分数据测量已实现了初步的数量化或半数量化,但距离滑坡机理研究的量化还有长的路要走。

最近几十年,研究降雨型滑坡的科研队伍不断壮大,研究方法呈现多样化发展,很多学者对同一地区或同一滑坡进行多种方法和试验手段的研究,为多方面寻找斜坡破坏滑动的可靠判据、建立预报模型和完善滑坡灾害预警体系提供了一定的技术支撑。模拟测试、原始滑坡监测与宏观调查统计、环境地质条件分析等多种定性、定量研究方法的结合,使试验研究成果更接近实际,更好的为我国的防灾减灾事业服务,逐步向全面建立降雨诱发滑坡的预警体系、准确预报降雨型滑坡灾害的终极目标迈进

感谢李宗亮教授级高工对本文的修改提出的中肯的建议!

参考文献:

- [1] 全国地质灾害通报(2008)[EB/OL].中国地质环境信息网. 2009-7-29
- [2] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征—基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29-34
- [3] 黄润秋,许强.典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008 2-16
- [4] 李焯芬,陈虹.雨水渗透与香港滑坡灾害[J].水文地质工程地质, 1997(4): 34-38
- [5] 谢守益,张年学,许兵.长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J].工程地质学报, 1995, 3(2): 60-69
- [6] 邢建民.堆积层滑坡与降雨关系浅析[J].长江职工大学学报, 1999, 16(3): 51-52
- [7] 张玉成,杨光华,张玉兴.滑坡的发生与降雨关系的研究[J].灾害学, 2007, 22(1): 82-85
- [8] 刘波,罗先启,张振华.三峡库区干将坪滑坡模型试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(2): 124-128
- [9] 严绍军,唐辉明,项伟.降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J].水文地质工程地质, 2007(2): 33-36
- [10] 张友谊,胡卸文,朱海勇.滑坡与降雨关系研究展望[J].自然灾害学报, 2007, 16(1): 104-108
- [11] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社, 1995 63-76, 24-25
- [12] 常晓军,丁俊,魏伦武,等.岷江上游地质灾害发育分布规律初探[J].沉积与特提斯地质, 2007, 27(1): 103-108
- [13] 徐则民,黄润秋,范柱国.滑坡灾害孕育—激发过程中的水岩相互作用[J].自然灾害学报, 2005, 14(1): 1-9
- [14] 詹良通,吴宏伟,包承刚,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, 2(4): 151-158
- [15] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等.堆积层滑坡野外模拟试验方案设计[J].公路, 2006(1): 74-79.

- [16] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等.堆积层边坡人工降雨致滑的原位监测试验研究[J].中国铁道科学,2006 27(4): 11—16
- [17] 龙万学,吴俊,傅鹤林.降雨型滑坡现场模拟试验研究[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2008,37(3): 20—23
- [18] 胡明鉴,张平仓,汪稔.降雨对滑坡的激发作用实验研究—以蒋家沟流域滑坡堆积坡地为例[J].水土保持学报,2001 15(5): 116—118
- [19] 胡明鉴,汪稔,张平仓.蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12): 1831—1834
- [20] 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
- [21] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4): 177—178
- [22] 张家发,张伟,朱国胜,等.三峡工程永久船闸高边坡降雨入渗实验研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2): 137—141
- [23] 胡明鉴,张平仓,汪稔.降雨对滑坡的激发作用实验研究—以蒋家沟流域滑坡堆积坡地为例[J].水土保持学报,2001,15(5): 116—118
- [24] 胡明鉴,汪稔,张平仓.蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验模拟[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12): 1831—1834
- [25] 陈晓清,崔鹏,冯自立,等.滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1): 106—116
- [26] 魏丽,单九生,边小庚.降水与滑坡稳定性临界值试验研究[J].气象与减灾研究,2006 29(2): 18—24
- [27] 魏丽,陈双溪,边小庚.暴雨型滑坡灾害因素分析及预测试验研究[J].应用气象学报,2007,18(5): 682—688
- [28] 谭新,陈善雄,杨明.降雨条件下土坡饱和、非饱和渗流分析[J].岩土力学,2003,24(3): 381—384
- [29] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2001,22(4): 447—450
- [30] 谢妮,王钊,邓卫东,等.非饱和土边坡的监测和人工降雨试验[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(2): 81—85
- [31] 刘海松,倪万魁,杨泓全,等.黄土路基降雨入渗现场试验[J].地球科学与环境学报,2008,30(1): 60—63
- [32] 宋克强,孙超图,袁继国,等.黄土滑坡的模型试验研究[J].水土保持学报,1991,5(2): 14—21
- [33] 罗先启,葛修润.滑坡模型试验理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008 1,44—75,105—157.
- [34] 黄晏,相群.关于降雨结构对岩基水流影响的试验研究[J].水土保持科技情报,2003(3): 11—13
- [35] 朱宝龙,胡厚田,陈强,等.降雨条件下固体废弃物边坡变形及破坏模式试验研究[J].工程地质学报,2004,12(3): 312—317
- [36] 彭轩明,张业明,鄢道平,等.三峡水库蓄水后秭归县几个典型滑坡的变形及监测[A].地质灾害调查与监测技术方法论文集[C].北京:地质出版社,2004

Simulation experiments of the rainfall induced landslides in China: insights and foresights

CHANG Xiaojun, WANG Dewei, TANG Yeqi

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract The simulation experiments of the rainfall induced landslides are believed to be an important technique for the examination of the genetic mechanisms of rainfall induced landslides. Since the 1990s, much research has focused on the rainfall induced landslides for the engineering geologists in China. The present paper gives a general review of the current states and future trends of the research of the rainfall induced landslides in China.

Key words simulation experiments of rainfall induced landslides; insight; foresight