

孙红月 吕庆 著

堆积层滑坡成因机理与防治



科学出版社

堆积层滑坡成因机理与防治

孙红月 吕 庆 著

国家自然科学基金项目(No. 40972187)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合大量堆积层滑坡勘查与治理工程实践,紧密联系工程建设需要,就堆积层滑坡的影响因素与成因类型、工程活动对边坡稳定性的影响方式等问题,进行了系统全面的阐述,提出了堆积层滑坡防灾的技术方案。主要强调滑坡稳定性影响因素分析,正确认识滑坡灾害的发生机理,实现防灾方案的合理选择,达到经济有效地防治滑坡灾害的目标。

本书可供地质工程、岩土工程、水利工程、公路工程、铁道工程等专业的科研技术人员和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

堆积层滑坡成因机理与防治/孙红月,吕庆著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-034681-0

I. ①堆… II. ①孙… ②吕… III. ①堆积区-滑坡-防治 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 120097 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:朱光兰
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 15

字数: 290 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

边坡是山地丘陵区工程建设的基本地质环境,确保边坡安全是人类生活与工程活动的基本要求。但大量工程建设场地地质环境较复杂,滑坡灾害时有发生,其中堆积层滑坡是最主要的滑坡类型。本书基于作者对大量堆积层滑坡实例的调查、监测及试验研究的成果,阐述堆积层滑坡的成因机理与防治工作应注意的问题。

堆积层滑坡数量多、分布广,是我国滑坡灾害中危害性最大的类型。堆积层边坡多由坡洪积、古崩滑堆积形成,形成时结构松散,具有大孔隙比、透水性强和易变形等特点,它们受地下水作用强烈,降雨引起的地下水位上升,常常是堆积层滑坡变形破坏的主要诱发因素。通过对大量堆积层滑坡实例的调查,作者发现堆积层边坡的地下水渗流环境十分复杂,不仅具有一般松散介质地下水渗流的基本形式,还具有两个重要的特性:①在长期的地下水渗流作用下,堆积层边坡中往往形成管道状渗流系统;②由于不同成因土层的渗透性差异很大,坡体中往往分布相对隔水层,使边坡的某些部位形成承压水。边坡变形破坏发展过程中,地下水渗流环境也会产生很大的变化,成为最终形成滑坡的重要因素。

堆积层分布区一般是缓坡地形,常有大量的工农业活动,人类活动引起的边坡水文地质条件的改变是此类滑坡发生的主要原因。坡面堆载一方面直接增大下滑力,另一方面堆载产生压缩变形会破坏松散土中的地下水渗流系统,使坡体的地下水位提高,从而进一步增大下滑力。坡脚开挖不仅减小滑坡的抗滑力,而且开挖面附近的局部坍塌还会导致地下水渗流管道的破坏,从而引起坡体地下水位的抬升,使边坡的整体稳定性进一步降低。村镇的生活用水和农业灌溉,使地表水大量入渗,也是诱发堆积层滑坡的常见原因。

堆积层滑坡有自身特点,其稳定性分析和治理技术选用应该注意到堆积土的物性特征。防止此类滑坡发生的最为有效和经济的措施就是降低滑坡体中的地下水位,在此基础上再结合滑坡的具体情况,辅以其他如“砍头压脚”和抗滑工程等措施,才能达到经济有效地防治滑坡灾害。

全书共 13 章,第 1~5 章探讨松散堆积层滑坡地下水渗流特性及其对边坡稳定性的作用方式,第 6~8 章归纳分析堆积层滑坡案例,第 9~11 章介绍堆积层滑坡稳定性分析与治理技术,第 12~13 章较完整地介绍了两个滑坡的监测与工程研究工作。第 1~8 章、第 12 章由孙红月撰写,第 9~11 章、第 13 章由吕庆撰写。

在本书完成之际,作者感谢中国工程院院士龚晓南教授对作者研究工作的指

导和帮助;感谢侯利国、陈允法、何文选、朱汝友、何建友等在上三高速公路滑坡研究中给予的大力支持和帮助;感谢徐建伟、郑求才、毛松根、胡启芳、应国强等在龙丽高速公路滑坡研究中给予的大力支持和帮助;感谢郑束宁、陈侃福等在公路滑坡研究中的友好合作和帮助;感谢王洲平、孙乐玲、李炜等在滑坡灾害研究中给予的大力支持和帮助;感谢课题组研究生李焕强、俞伯汀、王智磊、钟杰、许建聪、张洁等的相关专题研究中做出的贡献。特别感谢尚岳全教授在研究工作实施和书稿撰写过程中所给予的帮助。

由于堆积层滑坡涉及的岩土体结构复杂,影响稳定性的因素多变,因此进行系统性的探索研究是一项富有挑战性的工作。限于著者水平有限,书中难免存在疏漏和不足,敬请专家学者提出宝贵意见和建议,以便进一步补充、完善、发展和提高。

孙红月

于杭州浙江大学

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 堆积层滑坡	1
1.2 堆积层滑坡研究存在的问题	2
2 地下水对堆积层边坡稳定性的影响	5
2.1 降雨是诱发松散堆积层滑坡的主要因素	5
2.2 地下水淋滤作用形成软弱带	7
2.3 地下水位变化与边坡稳定性关系	8
2.4 边坡地下水渗流作用下的变形破坏试验	9
2.4.1 边坡地下水渗流试验模型	9
2.4.2 地下水渗流引起的边坡破坏过程	10
2.4.3 地下水渗流对坡体应力场的影响	11
3 堆积层边坡地下水管道渗流特性	14
3.1 堆积层边坡的地下水渗流特性	14
3.2 堆积层边坡渗流特性模型试验	16
3.2.1 物理模型简介	16
3.2.2 物理模拟试验过程	18
3.2.3 1# 模型渗流试验结果分析	18
3.2.4 地下水管道渗流系统形成过程中土体渗透性变化规律	22
3.2.5 土体压实程度对地下水管道渗流系统形成的影响	22
3.2.6 细粒土含量对土体渗透性能的影响	24
3.2.7 地下水管道渗流系统的破坏试验	24
3.2.8 堆积层边坡渗流试验基本认识	26
3.3 堆积层边坡管道渗流系统的分形特征	26
3.3.1 管道渗流系统的分形描述	26
3.3.2 模型试验结果的分形特征	29
3.4 管道渗流系统对滑坡稳定性的影响	30
3.4.1 管道渗流系统对滑坡下滑推力的影响	30
3.4.2 地下水管道渗流系统破坏对地下水渗流的影响	32

3.4.3 地下水管道渗流系统破坏对滑坡稳定性影响	32
4 隔水层对堆积层边坡稳定性的影响	34
4.1 隔水层对滑坡稳定性影响实例分析	34
4.1.1 滑坡概况	34
4.1.2 滑坡变形破坏机理	37
4.2 隔水层对边坡稳定性影响的模型试验	38
4.2.1 降雨影响的模拟结果	39
4.2.2 后缘地下水入渗模拟试验结果	40
5 堆积层边坡变形破坏对渗流场及稳定性影响	43
5.1 堆积层边坡解体破坏典型实例	43
5.1.1 滑坡区工程地质条件	43
5.1.2 滑坡特征及成因	44
5.1.3 滑坡稳定性分析	46
5.2 堆积层边坡解体破坏原因	47
5.3 解体破坏改变边坡地下水渗流条件	49
5.3.1 松散堆积层边坡的水文地质结构特征	49
5.3.2 解体破坏改变边坡地下水有效渗流过水断面	50
5.4 透水层有效渗流断面减小对流速影响	51
5.5 透水层地下水流速变化改变地下水压力分布	53
5.6 透水层地下水头压力变化对边坡稳定性的影响	55
6 坡面堆载诱发堆积层滑坡实例分析	57
6.1 下岩村小学滑坡	57
6.1.1 场区工程地质条件	57
6.1.2 滑坡特征及成因	61
6.2 上三高速公路 3# 滑坡	62
6.3 上三公路 5# 滑坡	64
7 坡脚开挖诱发堆积层滑坡实例分析	67
7.1 乐清市杨府路滑坡	67
7.1.1 滑坡概况与工程地质条件	67
7.1.2 滑坡的特征与成因	68
7.2 新昌县欧潭村滑坡	69
7.2.1 滑坡概况与工程地质条件	69
7.2.2 滑坡特征及成因	71
7.3 长牛公路煤山段 K2 滑坡	73

7.3.1	滑坡概况与工程地质条件	73
7.3.2	滑坡特征与成因	74
7.4	东阳市八达村滑坡	76
7.4.1	滑坡概况与工程地质条件	76
7.4.2	滑坡特征与成因	77
8	自然条件堆积层滑坡实例分析	79
8.1	下山村滑坡	79
8.1.1	地质环境条件	80
8.1.2	滑坡特征	83
8.1.3	滑坡成因分析	85
8.2	五度山滑坡	87
8.2.1	水文气象与地质环境条件	87
8.2.2	滑坡特征与成因	90
9	基于有限元强度折减法的滑坡稳定性分析	93
9.1	有限元强度折减法	93
9.1.1	安全系数的定义	93
9.1.2	强度折减有限元法的基本算法	94
9.2	有限元强度折减法的分析模型及参数确定	95
9.2.1	计算范围和边界条件的确定	95
9.2.2	初始自重应力场的计算	96
9.2.3	本构模型和失稳判据的选择	97
9.2.4	地下水的影响	97
9.2.5	潜在滑动面处理方法和参数选择	99
9.3	边坡失稳判据的讨论	99
9.4	有限元强度折减法计算精度主要影响因素	107
9.4.1	有限元网格密度的影响	107
9.4.2	迭代收敛容差的影响	108
9.4.3	计算模型边界效应的影响	108
9.4.4	坡高 H 及坡角 β 的影响	109
9.4.5	黏聚力 c 的影响	111
9.4.6	内摩擦角 φ 的影响	111
10	堆积层滑坡治理技术	114
10.1	滑坡治理技术	115
10.2	以治水为主的滑坡治理技术	118

10.3	目前治理措施存在的主要问题	119
11	堆积层滑坡抗滑桩加固的土拱效应分析	121
11.1	分析方法及计算模型	121
11.1.1	土体的本构模型选择	122
11.1.2	桩土接触界面的模拟	124
11.1.3	有限元分析模型	126
11.1.4	计算模型的验证	128
11.2	桩后土拱的发育规律	129
11.3	抗滑桩桩后土拱的形状研究	136
11.3.1	土拱形状的结构力学分析	136
11.3.2	基于有限元法的土拱形状研究	139
11.3.3	土拱形状的主要影响因素分析	142
11.4	抗滑桩桩后土拱效应的主要影响因素研究	144
11.4.1	桩间距对土拱效应的影响	145
11.4.2	桩周土体参数对土拱效应的影响	147
11.4.3	桩土界面参数对土拱效应的影响	152
11.4.4	桩径及桩形的影响	154
12	龙游县渡贤头村滑坡监测分析	157
12.1	滑坡的地质环境特征与成因	158
12.1.1	滑坡工程地质条件	158
12.1.2	滑坡的形成条件分析	160
12.2	滑坡稳定性与地下水位变化的关系	160
12.3	滑坡防治工程	161
12.4	滑坡安全综合监测	164
12.4.1	监测技术内容与方法	164
12.4.2	GPS监测结果分析	165
12.4.3	降雨量和钻孔水位及排水洞流量监测结果	167
12.5	降雨量与钻孔地下水位及排水隧洞水流量关系	172
12.6	边坡加固效果分析	176
13	新昌县下岩村滑坡成因机制与工程治理	177
13.1	工程地质环境条件	178
13.1.1	地形地貌	178
13.1.2	地层岩性	178
13.1.3	场地水文地质条件	181

13.1.4 地下水的承压特征	184
13.2 滑坡体结构与变形破坏特征	185
13.2.1 滑坡体结构特征	185
13.2.2 松散堆积体形成演化过程分析	187
13.2.3 滑坡变形破坏的特征	189
13.3 滑面强度参数试验与反分析	196
13.3.1 滑坡体强度参数的土工试验结果	196
13.3.2 滑带特性及力学试验研究	196
13.3.3 滑面强度参数的反分析	199
13.4 滑坡变形破坏机制的数值模拟	200
13.4.1 计算模型	200
13.4.2 弹塑性材料接触模型数值分析	201
13.4.3 滑面强度参数变化对滑坡变形破坏的影响	204
13.5 基于强度折减法的滑坡稳定性分析	206
13.5.1 滑坡加固前后的稳定性分析	206
13.5.2 抗滑桩的受力和变形分析	208
13.6 连续介质假定条件下滑坡渗流场数值模拟	211
13.6.1 渗流模型	212
13.6.2 模型的参数取值	214
13.6.3 排水洞的作用	215
13.6.4 农业灌溉水渠漏水对滑坡体地下水位的影响	216
13.6.5 抗滑桩对滑坡体地下水位的影响	218
13.7 滑坡治理措施与效果	219
13.7.1 治理方案分析	219
13.7.2 排水治理工程	221
13.7.3 排水工程对提高滑坡稳定性的作用	222
13.7.4 经治理后滑坡稳定性	224
13.8 基本认识	225
参考文献	228

1 绪 论

1.1 堆积层滑坡

堆积层滑坡是指发生在第四系及近代松散堆积层的一类滑坡。其数量多、分布广、危害大，在我国的滑坡灾害中占有很大的比例。对浙江省进行的 946 处滑坡统计中，78.1% 都是堆积层滑坡（王洲平，2001）。在三峡库区的长江上游地区 100km² 范围内，普查结果发现 1736 处滑坡，其中 64% 为堆积层滑坡（夏金梧，1997）。由于堆积滑坡坡体结构松散，具有大孔隙比、强透水性、易变形等特点，地下水是堆积层滑坡变形破坏的主要诱发因素。如长江鸡扒子滑坡和新滩滑坡、甘肃洒勒山滑坡等都与地下水的活动有关。堆积层滑坡不仅数量多，而且规模也很大，常常造成重大的经济损失。

堆积层边坡多由坡洪积、古崩塌或古滑坡堆积等原因形成，其稳定性与地下水位变化关系密切。国内外对此类滑坡的研究十分重视，已对滑坡发生的临界暴雨强度、雨水入渗与滑坡关系、地下水位变化与滑坡关系等方面的问题进行了比较深入的研究（Cascini et al. , 2010; Chen et al. , 2003; Schmertmann, 2006; 贺可强等，2008），在滑坡治理方案中也把降低地下水位作为重要的手段（Hartani et al. , 2003; 胡启芳，2009; 李晓军等，2010; 刘加龙等，2007）。目前，仍有许多问题没有得到很好解决，滑坡的发生为何存在临界暴雨强度；堆积层滑坡为何常经历一个较长的变形发展过程，且坡面裂缝经常会有地下水冒出；相邻排水孔的出水量为何会有很大差别？这些问题事实上都与边坡的地下水渗流特性有关。

通过对大量堆积层滑坡的调查，发现堆积层边坡中往往发育有地下水管道状渗流系统，初步的模型试验也证实了管道状渗流系统的存在（尚岳全等，2002，2005）。日本学者（Uchida et al. , 2001）发现上部碎石土斜坡中因发育管道流，可对下部滑坡体进行快速的地下水补给，认为管道流是诱发滑坡的因素之一。但国内外对地下水管道状渗流系统未开展过系统的研究，对斜坡地下水管道状流及其在滑坡形成与发展中的作用还缺乏必要的探讨，目前主要限于一些定性的描述。大量堆积层边坡监测资料分析和水文地质调查，均证实了含碎石土边坡中存在地下水管道状排泄系统，坡体的局部变形会破坏地下水管道状排泄系统，从而导致地下水位上升，这是诱发滑坡的重要原因。我国南方地区雨水充沛，在长期

的地下水渗流作用下,堆积层边坡中往往形成管道状地下水排泄系统。在人工开挖坡面或自然斜坡坡脚附近,常常可以看到地下水以泉点的形式出露,而且可以看到由地下水流动形成的管道状空洞。当堆积层边坡发育管道排泄系统时,地下水渗透压力的作用性质和大小都将发生根本的改变。模型试验结果表明,在发育管道状地下水排泄系统的边坡中,地下水主要在管道中流动,不会产生通常概念的渗透力,管道的强渗透性还能有效地限制地下水位的上升。对堆积层边坡的渗流特性开展系统的研究,揭示地下水管道渗流系统的形成条件、管道渗流条件下地下水渗透力的作用方式、地下水管道渗流系统被破坏后的恢复过程等,无论对提高滑坡研究理论水平还是对滑坡的工程治理设计均具有重大意义。

当分析地下水对边坡稳定性影响时,通常假定坡体具有均匀的渗流特性,基于均匀介质渗流理论,采用数值分析方法,模拟计算降雨前后坡体中地下水位的变化过程(程平等,2006),分析地下水位变化对坡体变形破坏与稳定性变化的作用规律(Nandy et al., 2001; 朱文彬等, 2002),探索利用地下水位变化对边坡稳定性影响的建模预测(贺可强等, 2008)。滑坡稳定性极限平衡分析以条分法为主,通过多年的发展,先后经历了半精确条分法阶段的固定形状滑面、稳定系数指标、力矩平衡、力平衡假设下的分析,精确条分法阶段的任意形状滑面、固定作用力倾角、固定土条侧向力作用点的分析,使极限平衡分析法在力学处理上臻于成熟。但在含渗流场的极限平衡分析中,目前仍是建立在以水位单一变量为基础之上的分析,而忽略各层水位高低不同对坡体稳定性的影响。事实上,均匀渗流假设可能产生很大的误差。

当前我国在山地丘陵区工程建设规模和数量日益扩大,特别是大规模的山区公路建设,许多在建和拟建工程地处复杂的地质环境,或穿过复杂的地质地貌区,建设过程中涉及大量复杂的岩土工程问题,而其中的堆积层滑坡问题常常成为影响工程建设工期的关键因素。堆积层滑坡灾害除了导致工程造价的大幅增加和工期延后外,在工程运行期间还可能潜在危害而影响工程的正常运营。因此,研究堆积层滑坡的变形破坏机理,分析堆积层滑坡的影响因素,正确评价堆积层滑坡的稳定性状况,对避免或减少堆积层滑坡灾害的发生、保障生命财产安全、减少经济损失等均具有重要意义。

1.2 堆积层滑坡研究存在的问题

由于滑坡问题的普遍性和严重的危害性,这方面的研究一直受到广泛的关注,取得了大量的研究成果,为滑坡机理分析和滑坡治理奠定了良好的基础。但由于滑坡问题的复杂性,目前仍有许多滑坡基础理论问题没有得到很好解决,对滑坡治理技术的合理应用研究更是缺乏系统性讨论,制约了滑坡防治水平的有效

提高。存在的主要问题有:

(1) 堆积层边坡失稳大多与工程活动引起的地下水渗流条件的改变有关。坡脚开挖或坡面堆载导致局部坡体变形会引起局部渗透性的改变,坡面工程建设影响地表水的入渗方式,边坡工程加固措施不仅影响坡体的渗透性而且还改变渗流的过水断面。工程活动引起地下水渗流条件的改变对堆积层滑坡的稳定性有重要影响,特别是堆积层边坡中往往形成管道状地下水排泄系统,这些管道的强渗透性能有效地限制地下水位的上升,从而使边坡处于稳定状态,工程作用会破坏这种有利边坡稳定的条件。目前国内外对工程活动引起的力学作用研究较深入,但对斜坡地下水渗流条件改变及其在滑坡形成与发展中的作用还缺乏系统的分析研究。

(2) 松散堆积土边坡往往地质结构复杂,坡体堆积物常常包括崩塌堆积、滑坡堆积、坡积、冲洪积等。坡体通常存在渗透性差异很大的不同成因土层,或者说坡体中往往分布相对隔水层,它们的存在常常会使边坡的某些部位形成承压水,从而影响边坡的稳定性。从大量滑坡案例的调查过程中发现,许多边坡中都有隔水层的存在,它们常常使潜在滑面的部分区域孔隙水压力增大,从而影响滑坡的稳定性及滑坡体的变形破坏发展过程。在目前的边坡稳定性研究中,对隔水层的作用还未进行充分的研究。

(3) 边坡变形破坏过程中常常会出现次级破裂面,它们不仅影响边坡的应力场,而且会影响边坡的地下水渗流条件。次级破裂面引起地下水渗流条件改变,可能是影响许多边坡稳定性的重要原因,但以往研究很少涉及边坡次级破裂面导致地下水渗流场变化问题。堆积层边坡土体强度低,在变形和蠕滑过程中,容易产生解体破坏。当边坡开挖坡度过大或边坡高度过大时,因边坡土体的强度不足,会产生坡面附近岩土体的剪切破坏或拉张破坏。滑坡整体滑动过程中,因底滑面形态起伏和强度差别等原因,会引起滑面不同区段滑动位移量的差别,导致滑坡解体破坏,产生次级滑面。堆积层边坡往往存在渗透性差异很大的不同成因土层,或者说坡体中往往分布相对透水层和相对隔水层。出现次级破裂面后,对水文地质条件影响的主要表现包括:有利于地表水入渗,改变不同含水层的渗流过水断面,引起坡体不同部位地下水位的变化,甚至局部产生承压水,从而改变主次滑面上的孔隙水压力。透水层有效过水断面改变后,引起潜在滑动面的孔隙水压力水头的变化,就会改变边坡稳定性。

(4) 绝大多数滑坡的发生是与降雨紧密联系的,因为降雨导致了地下水位的上升而降低了滑坡的稳定性。地下水对滑坡稳定性的影响是有目共睹的,但目前对滑坡治理工程中,控制地下水位上升的方法很少被作为主要滑坡治理手段,而仅将其作为一种辅助方法,只是作为提高滑坡治理的安全余度进行考虑。究其原因,目前对降排地下水工程措施研究不够深入,关于降排地下水提高滑坡稳定性

的作用机理认识不足，对降排地下水措施的可靠性研究不够，从而制约了降排地下水作为滑坡主要治理措施的推广应用。因此，结合滑坡治理工程实践，系统深入地研究地下水对滑坡稳定性的影响方式，研究滑坡地下水渗流规律，探索有效控制地下水位上升的技术手段，建立合理的滑坡安全性评价方法体系是当务之急。

2 地下水对堆积层边坡稳定性的影响

滑坡是工程活动中常见的地质灾害，而其中的堆积层滑坡是最主要的滑坡类型。多数滑坡的发生与地下水活动直接相关，地下水对滑坡稳定性的影响方式和作用机理是多方面的，目前研究地下水对滑坡稳定性的影响大多限于宏观表现的一般规律性分析，如通过统计研究，分析降雨过程与滑坡灾害的关系；基于均匀介质渗流理论，采用有限元数值分析方法，模拟降雨前后坡体中地下水位的变化过程以及由此引起的坡体塑性区变化的基本规律；采用人工神经网络方法预测滑坡内地下水位在排水工程实施前后的变化，分析排水工程的效果等。事实上，由于边坡介质的非均匀性和滑坡过程中变形破坏具有非连续性，滑坡过程中地下水位变化和地下水渗流方式的变化是一个复杂的过程，而滑坡治理工程大多又是在滑坡出现一定变形破坏时才实施的。因此，认识地下水在滑坡变形破坏过程中的作用方式，揭示滑坡变形破坏过程中地下水渗流方式的变化规律，对正确分析基于宏观规律研究所获得的成果和选择合理的滑坡治理方案具有重要意义。

2.1 降雨是诱发松散堆积层滑坡的主要因素

大多数滑坡的发生与地下水活动有关，地下水的动态变化直接关系到滑坡的稳定性状况。因此，目前开展了大量研究着眼于滑坡与降雨之间关系（Cascini et al. , 2010；刘才华等，2005；明海燕等，2007）以及地下水位变化对滑坡稳定性的影响方式（Chen et al. , 2003；Lee et al. , 2009），从降雨历时、降雨量、降雨强度及降雨形式对滑坡稳定性影响等方面进行分析。如采用有限元法动态分析降雨诱发滑坡机理，采用极限平衡方法分析降雨诱发滑坡条件，采用有限元法研究非饱和土暂态孔隙水分布、孔隙水压力和基质吸力，结合极限平衡分析计算降雨对非饱和土边坡稳定性系数的影响，采用有限元法分析地下水渗流场变化，研究降雨条件下非饱和土边坡的稳定性。通过这些研究，获得了降雨与滑坡关系的认识。

降雨是诱发滑坡产生的主要原因。雨水下渗到土体中可以造成两个方面的结果，一是渗透水进入土体的孔隙和岩石的裂缝，使土石的抗剪强度降低；二是渗透水补给地下水，使地下水位抬升，减小滑动面的有效法向应力，渗透压力增大坡体的下滑力。例如 2005 年 6 月连日暴雨造成福建省鹰厦、横南线路多处塌方（见图 2.1），两条线路中断，大量客货列车滞留在沿线。



图 2.1 鹰厦、横南铁路边坡塌方

水的软化作用是指由于水的入侵使岩土体强度降低。水的软化作用对边坡稳定性的危害很大。当边坡岩体或软弱夹层的亲水性强时,易溶于水的矿物,如含盐的黏土质页岩等,浸水后易发生变化,岩石和岩体结构受到破坏,发生崩解泥化现象,使抗剪强度降低,影响边坡稳定。对于土质边坡,浸水后的软化现象更加明显。尤其是一些黏性土质边坡,在干燥或少水的情况下,黏性土块较硬,强度较高,边坡的稳定性好,在有水入侵坡体后,黏性土会变得很软,强度下降很多。黏性土的渗透能力变差,侵入坡体的水不易排出。所以,前期的降水影响边坡地下水的状态,对边坡的稳定性影响也很大。尤其是长时间的阴雨天气,对黏性土质边坡的稳定性尤为不利。图 2.2 为司筱线 K0+200 处公路黏性土边坡坍塌情况,产生原因是边坡土体含水量很高,后缘部分土体有水渗出。



图 2.2 黏性土边坡坍塌

连续降雨后的强降雨,或经历长期干旱后的强降雨,更易诱发大量滑坡灾害。例如 2009 年中国西部山区降水量异常偏少,众多地区连续经历了数月旱灾,2010 年随着雨季的到来,强降雨条件使得灾害也出现了暴发趋势(崔云等,2011)。多数滑坡发生时间分布与雨季对应,以长江上游为例,据调查统计显示:94%的滑坡发生在雨季,结果如表 2.1 所示(崔云等,2011)。

表 2.1 雨季(5~9月)滑坡发生数量统计

地区	滑坡个数	雨季滑坡个数	占比/%
毕节地区	42	40	96
甘肃南部	213	203	95
万州地区	294	256	87
凉山地区	212	203	95
金沙江下游	477	458	96
合计	1238	1160	94

对湖北省 1975~2002 年发生的 212 次滑坡进行统计分析,结果如图 2.3 所示(张玉成等,2007),其中 5~9 月期间发生的滑坡占全年的 79%,这期间的月平均雨量也占全年总雨量的 68%。

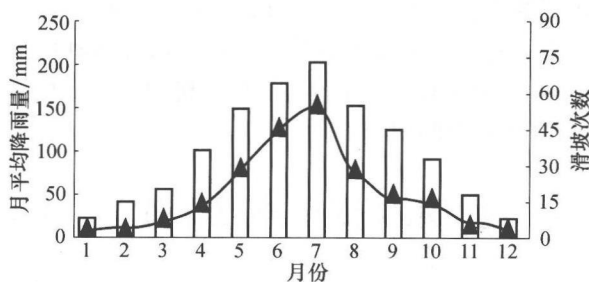


图 2.3 月平均降雨量和滑坡次数对应图

2.2 地下水淋滤作用形成软弱带

降雨可直接诱发滑坡的现象已经得到广泛的关注,但降雨引起的地下水淋滤作用常常被忽略。受堆积层的成因结构特征所决定,许多堆积层形成时往往结构松散,渗透性好,降雨过程中引起的地下水下渗可以冲刷细颗粒,常常使堆积层沿基岩面附近细颗粒积聚,使接触带成为潜在的滑动面。图 2.4 为新昌县下岩村滑坡的滑动带,该土样从探井中取得,可以看出滑面光滑,黏粒含量高。但离开滑面数毫米就分布有较多的粗颗粒,而该滑坡的坡体主要由含碎石亚黏土和碎石土组成,粗颗粒含量很高。