

松散填土边坡 降雨流滑灾变过程研究

李维朝 邓刚 张雪 孙玉进 著



科学出版社

松散填土边坡降雨流滑 灾变过程研究

李维朝 邓 刚 张 雪 孙玉进 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对流滑这类突发性强、高速远距的灾难性滑坡,对典型案例进行了收集,对当前的研究进展进行了总结,而后以一松散填土边坡为依托,从水文诱灾、破坏起动和运动堆积三个灾变时序阶段出发,研究了其降雨流滑灾变过程。水文诱灾阶段主要是在滑后水文响应监测分析和饱和-非饱和瞬态降雨入渗模拟的基础上,确定了内外因控制作用下的一类滞后型降雨滑坡水文响应模型,并展现了其水文诱灾过程。破坏起动阶段主要是在材料物理力学试验的基础上,从临界状态土力学的角度出发,分析了松散填土流滑的静态液化机理,然后基于数值模拟展现了静态液化区渐近扩展的流滑起动过程。运动堆积阶段介绍了离散元法、粒子有限元法和物质点法三种流滑运动过程数值模拟方法,并对流滑运动堆积过程与影响因素进行了分析。

本书可供土建、地质、公路、铁路、尾矿等部分从事工程地质或岩土力学研究的科技人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

松散填土边坡降雨流滑灾变过程研究 / 李维朝等著. —北京:科学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-03-052903-9

I. ①松… II. ①李… III. ①边坡稳定性-研究 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 117059 号

责任编辑:张井飞 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京威通印刷股份有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:226 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流滑(flowslide)是在动力或静态条件下剪切面土体剪缩,引发孔隙水压力瞬时激增、剪切面强度骤然降低,从而导致滑体呈流态运动的一类滑坡灾害,多发生于尾矿砂、煤矸石、黄土、填土、城市固体废弃物堆填体、火山灰等松散无黏性土边坡,也发生于敏感黏土边坡,受气候、地质、地震、人类活动等条件的影响,具有突发性强、高速远距等特点,易造成灾难性的后果。

连日暴雨停止 13 小时后,2002 年 9 月 18 日我国深圳市羊宝地一松散填土边坡发生浅层快速流滑,造成 5 人死亡、31 人受伤。本书以该实例为依托,在总结前人研究成果的基础上,以灾变过程为主线,围绕水文诱灾、破坏起动和运动堆积三个灾变时序阶段开展了研究,展示了内外因控制作用下的一类滞后型水文诱灾过程、静态液化区渐近扩展的流滑起动过程和重力、地形等因素联合控制作用下的流滑运动堆积过程,介绍了离散元法、粒子有限元法和物质点法三种基于非连续法和连续法的流滑运动过程数值方法,以为流滑风险分析与防治等提供参考。全书共分 9 章,由中国水利水电科学研究院的李维朝高工和邓刚教高统稿,澳大利亚纽卡斯尔大学张雪博士和清华大学孙玉进博士分别撰写了其中的第 8 章和第 9 章。

本研究工作曾得到北京工业大学戴福初教授指导;现场试验与现场监测受到了中国科学院武汉岩土力学研究所闵弘研究员、深圳市地质环境监测中心王明龙高级工程师、西安交通大学许领教授和香港大学 T. C. Chen 先生的帮助;起动模拟的本构程序由原香港科技大学 C. Y. Cheuk 博士提供;水文响应分析及离散元模拟分析获得了马来西亚 Tunku Abdul Rahman 大学 Lee Min Lee 副教授的帮助;中国地质科学院地质力学研究所姚鑫研究员及研究生曹文和李文光等就本书编写给予了帮助。著书过程中,中国水利水电科学研究院岩土工程研究所领导与同事给予了一如既往的支持。在此一并致以诚挚的感谢。

研究开展和书籍出版得到了中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点试验室和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB047004)、国家自然科学基金项目(51309259、51379221)等的资助。

由于作者水平有限,书中难免瑕疵或疏漏,敬请读者批评指正。文献引用如有遗漏之处,敬请原作谅解。

作者
2017 年 6 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 流滑研究的重要意义	1
1.2 降雨条件下边坡水文响应研究	4
1.3 降雨条件下流滑起动过程研究	8
1.4 流滑运动堆积过程研究	13
1.5 本书研究内容与研究手段	19
参考文献	22
第2章 羊宝地填土边坡流滑概况	32
2.1 滑坡区地质环境条件	32
2.2 滑坡特征	35
2.3 降雨特征	39
参考文献	40
第3章 填土边坡水文响应监测分析	41
3.1 监测目的	41
3.2 监测设计	42
3.3 监测结果分析	48
3.4 水文地质概化模型	66
3.5 本章小结	67
参考文献	68
第4章 填土边坡水文诱灾过程研究	71
4.1 概述	71
4.2 计算模型	71
4.3 降雨条件下瞬态饱和-非饱和水文诱灾过程	78
4.4 本章小结	86
参考文献	87
第5章 流滑静态液化机理研究	88
5.1 概述	88
5.2 填土的基本物理性质	88
5.3 填土的水理特性	91

5.4 填土的力学性质	91
5.5 松散填土滑坡静态液化机理	105
5.6 本章小结	106
参考文献	107
第6章 流滑破坏起动过程研究	108
6.1 计算模型	108
6.2 模拟结果分析	114
6.3 流滑破坏起动过程分析	119
6.4 本章小结	119
参考文献	120
第7章 基于离散元的流滑运动堆积过程研究	121
7.1 概述	121
7.2 颗粒流基本理论	121
7.3 计算模型	124
7.4 计算参数	126
7.5 运动堆积过程分析	132
7.6 本章小结	141
参考文献	142
第8章 基于粒子有限元的流滑模拟	144
8.1 概述	144
8.2 粒子有限元法	145
8.3 颗粒柱坍塌问题模拟	150
8.4 羊宝地流滑运动过程模拟	155
8.5 本章小结	162
参考文献	163
第9章 基于物质点法的流滑模拟	165
9.1 概述	165
9.2 物质点法基本理论	165
9.3 应力更新与材料本构	171
9.4 颗粒柱动态坍塌过程模拟	172
9.5 羊宝地流滑运动过程模拟	173
9.6 本章小结	178
参考文献	178

第1章 绪 论

1.1 流滑研究的重要意义

流滑 (flowslide) 是在动力或静态条件下剪切面土体剪缩, 引发孔隙水压力瞬时激增、剪切面强度骤然降低, 从而导致滑体呈流态运动的一类滑坡灾害 (Bishop, 1973; Eckersley, 1990; Stoutjesdijk et al., 1998; Hungr et al., 2001; Olivares and Damiano, 2007)。1938 年美国 Fort Peck 水力冲填坝在施工过程中产生流滑, 导致 80 人死亡, 这一事件使得土木工程师开始关注流滑 (Bishop, 1973)。表 1.1 为依据参考文献摘录的一些流滑灾害。流滑多发生于尾矿坝、黄土、松散填土、城市固体废弃物、垃圾堆填体、火山灰等松散无黏性土边坡中, 也发生于敏感黏土边坡中, 具有起动前缺乏表征现象, 运动中速率快、距离远、体积大、扇形沉积等特点。这些特点使得流滑危险性高、突发性强、破坏性大, 一旦发生往往造成灾难性的人员伤亡和经济损失。

鉴于流滑速度快、破坏力强、风险大等特征, 国内外许多专家曾针对某单个灾难性流滑或某类条件相近、屡有发生的流滑开展了研究。例如, Bishop (1973) 对矿渣山、矸石山、水力冲填坝等流滑开展了研究; Mitchell 和 Markell (1974) 对敏感性土流滑开展了研究; Kramer (1988) 对海岸沉积土的液化流滑开展了研究; Dawson 等 (1998)、Hungr 等 (2002) 对加拿大英属哥伦比亚矿山废渣区的流滑破坏开展了大量研究; Geertsema 等 (2006) 对加拿大英属哥伦比亚北部体积超过 50 万 m^3 或长度大于 1 km 的流滑资料进行了收集整理, 并对流滑发生的地质条件、物质组成、触发条件、破坏形势等进行了分析; Wang (2005) 对日本筑馆和山科两个自然斜坡分别在地震和降雨诱发流滑机理下的差异进行了分析; Chen 等 (2004)、赵春宏和戴福初 (2007) 研究了中国深圳和香港地区的松散填土边坡降雨流滑; Bilotta 等 (2005) 对意大利坎帕尼亚区的火山灰渣流滑破坏开展了研究; Evans 等 (2009) 对 1949 年塔吉克斯坦海特地震触发的黄土流滑开展了研究; 我国一些学者针对甘肃黑方台黄土灌溉导致流滑的机理开展了研究 (金艳丽和戴福初, 2007b, 2008; Zhang et al., 2009; 许领, 2010)。流滑往往无预兆, 突发性强, 并且运动速度快、用时短, 致使原位观察数据较少。当前关于流滑的研究成果主要来自流滑后开展的室内试验、物理模型、数值模拟等工作 (Picarelli et al., 2005)。

表 1.1 部分有记载的流滑灾害

时间	地点	材料	诱因	危害	备注
1907 年 4 月 11 日	美国马萨诸塞州 Wachusett 坝	细松砂	蓄水	Wachusett 坝北堤上游侧坝壳细松砂因蓄水静态液化, 水平流动约 100m	Olson 等 (2000)
1920 年 12 月 26 日	中国甘肃	松散和黄土类型的粒状沉积土	8.5 级地震	史记最大流滑, 影响范围 260km ² , 城市被掩埋, 某白杨树被推移约 1.6km, 约有 20 万人死亡	陈文化 (2001)
1938 年 9 月 22 日	美国蒙大拿州	砂	加载	在施工过程中, Fort Peck 水力冲填坝因加载导致液化, 3min 内约 760 万 m ³ 滑体移动了约 427m, 导致 80 人丧生	Bishop (1973)
1949 年 7 月 10 日	塔吉克斯坦 Yassman 山谷	黄土	M7.4 级 Khait 地震	流滑沉积体长约 20km, 占地约 24.4km ² , 平均厚度约 10m, 总体积约 2.45 亿 m ³ , 预计 4000 人丧生	Evans 等 (2009)
1949 年 7 月 10 日	塔吉克斯坦 Obi-Kabud 山谷	岩石碎屑及黄土	M7.4 级 Khait 地震	地震激发岩质滑坡, 部分滑体落入坡脚黄土后, 黄土因加载液化。总滑体约 0.75 亿 m ³ , 水平滑动 7.41km, 前缘平均速度为 38.5m/s, 预计 800 人丧生	Evans 等 (2009)
1966 年 10 月 20 日	英国默瑟蒂德菲尔附近的威尔士采煤小村庄阿伯方	煤矿废渣	强降雨	约 10.7 万 m ³ 矿渣, 掩埋乡村小学, 致使 147 人死亡	Bishop 等 (1969); Bishop (1973)
1971 年 11 月 11 日	日本神奈川县川崎市	砂土	人工降雨	现场足尺人工降雨滑坡试验, 结果弄巧成拙, 降雨诱发流滑, 滑速达 20~30m/s, 导致 15 人遇难, 11 人受伤	羽岛谦三 (1972)
1972 年 6 月 18 日和 1976 年 8 月 25 日	中国香港特别行政区秀茂坪	填土	暴雨	1972 年 6 月填土边坡流滑造成 71 人受伤, 60 人受伤。1976 年 8 月 25 日再次破坏, 造成 18 人死亡, 24 人受伤	李焯芬和陈虹 (1997); 梁茂田和年廷凯 (2003)
1985 年 9 月 9 日	加拿大英属哥伦比亚 Quintette Mountain 1660	煤矿矸石	堆载导致静态液化	高约 240m、体积约 250 万 m ³ 的煤矿矸石山, 滑动 2200m	Dawson 等 (1998)

续表

时间	地点	材料	诱因	危害	备注
1989年10月26日	加拿大英属哥伦比亚 Fording South Spoil	煤矿矸石	堆载导致静态液化	高约400m、体积约390万m ³ 的煤矿矸石山, 滑动800m	Dawson等(1998)
1992年5月11日	加拿大英属哥伦比亚 Greenhills Cougar 7	煤矿矸石	静态液化, 诱因不详	高约100m、体积约20万m ³ 的煤矿矸石山, 滑动700m	Dawson等(1998)
1993年4月28日	土耳其伊斯坦布尔 Umraniye-Hekimbasi	垃圾	剪切变形	剪切变形导致填埋场非压实废弃物静态液化。体积约120万m ³ , 摧毁房屋11处, 造成39人死亡, 破坏一条重要污水管线, 形成污水堰塞湖	Kocasooy 和 Curi (1995); Blight 和 Fourie (2003)
1994年2月22日	南非 Merriespruit	金矿尾矿砂	漫顶	漫顶冲蚀掉金矿尾矿坝下伏高孔隙比尾矿材料的束缚, 诱发静态液化。大约60万m ³ 的尾矿滑至下游村庄, 最大滑动距离达3km, 事故共造成17人丧生	Blight 和 Fourie (2003); Fourie 等 (2001)
1998年5月5日至6日	意大利坎帕尼亚区 Pizzo d'Alvano Massif	火山碎屑	降雨	约300万m ³ , 滑速可达20m/s, 摧毁村庄4座, 造成160人死亡	Bilotta等(2005)
2001年1月13日	萨尔瓦多 Santa Tecla	火山碎屑(粉质砂土和砂质粉土)	7.6级地震	约13万m ³ , 滑行约735m, 造成约585人死亡	Evans 和 Bent (2004)
2002年9月18日	中国广东省深圳市羊宝地	松散全风化花岗岩填土	降雨	约2.5万m ³ 的松散填土体在水平地面高速滑动了140m, 造成5人死亡、31人受伤	赵春宏和戴福初(2007)
2003年11月28日	加拿大英属哥伦比亚 Khyex 河	由砾状坡积物覆盖的冰海相沉积物	河岸侵蚀	滑体约470万m ³ , 流滑距离1.7km, 封塞河道, 导致上游回水约10km	Schwab等(2004); Geertsema等(2006)
2006年10月6日	中国陕西省华县大明镇高楼村	黄土	灌溉	约5.5万m ³ 的黄土滑动约330m, 摧毁房屋24处, 掩埋13人, 其中12人死亡	Zhang等(2009)
2014年3月22日	美国华盛顿 Oso	冰碛物及冰湖相粉土及黏土	降雨	约800万m ³ , 横跨1km的洪泛区, 掩埋高速公路 SR 530, 造成43人死亡, 是美国历史上第二大灾害性滑坡	Iverson等(2015)

松散填土边坡降雨流滑是流滑中的一类,其灾变过程是一个复杂的、随时空流化的动态过程,可细分为孕育过程、起动过程和运动过程,它是一个力学灾害链,涉及降雨入渗→饱和度增加→强度降低→体积剪缩→静态液化→强度剧降→流态运动多个环节。研究流滑灾变过程,可以揭示流滑高速运动的机理,定量预测流滑的持续时间、速率、冲击力、滑动距离、覆盖范围等灾害效应,对于流滑风险分析、治理措施等减灾防灾工作具有重要的意义。

1.2 降雨条件下边坡水文响应研究

降雨是诱发滑坡的主要因素,特别是在意大利、新加坡、马来西亚、巴西、中国香港等地处热带的国家和地区,降雨滑坡更是常见的地质灾害(Au, 1998; Glade, 1998; Dai et al., 1999; Smyth and Royle, 2000; Toll, 2001; Guzzetti et al., 2004; Lee and Pradhan, 2007)。

鉴于降雨对边坡稳定性的重要影响,研究降雨条件下边坡的水文响应十分重要。边坡所处的地质环境及受地质环境影响的降雨入渗路径都是十分复杂的,降雨模式、地形地貌、地质条件、坡体物质的工程性质等都会影响边坡的水文响应(Keefer et al., 1987; Au, 1993; Montgomery and Dietrich, 1994; Stoutjesdijk et al., 1998; 黄润秋和戚国庆, 2002; Sidle and Ochiai, 2006)。降雨在入渗过程中会首先选择最大入渗能力处扩展,也就是在同等条件下,地下水会最先沿着最大渗透系数的方向入渗、扩展,植被的根部、基岩中的节理、岩土体的渗透性、坡体表面的干缩裂缝、岩土体中的高渗透层等都会对入渗路径产生影响(Wieczorek, 1987; Leroueil, 2001; Matsushi and Matsukura, 2007; Tarolli et al., 2008)。明确边坡水文响应的影响因素,理解这些因素的影响方式,有助于分析不同降雨模式下边坡瞬态渗流场的时空变化及边坡应力状态与强度变化,是边坡变形稳定分析的前提条件(Keefer et al., 1987; Reid and Iverson, 1992)。

前人对边坡降雨水文响应影响因素的研究可以分为内因和外因两方面,内因主要指边坡的地形地貌、地质条件和物理性质,外因主要指降雨模式。内外因相结合,协同作用,影响了降雨入渗条件下边坡的水文响应过程(图 1.1)。

1.2.1 降雨模式

降雨模式是水文响应的外在影响因素,主要包括降雨量(precipitation)、降雨强度(intensity)、降雨持续时间(duration)、重现期(return period)及前期降雨量(antecedent precipitation)等,它与边坡地形地貌、地质条件和物理性质等内因相结合,控制着边坡的水文响应(Wieczorek, 1987; Ng and Shi, 1998; 吴宏伟等, 1999; Leroueil, 2001; Aleotti, 2004)。当前对降雨模式的研究主要

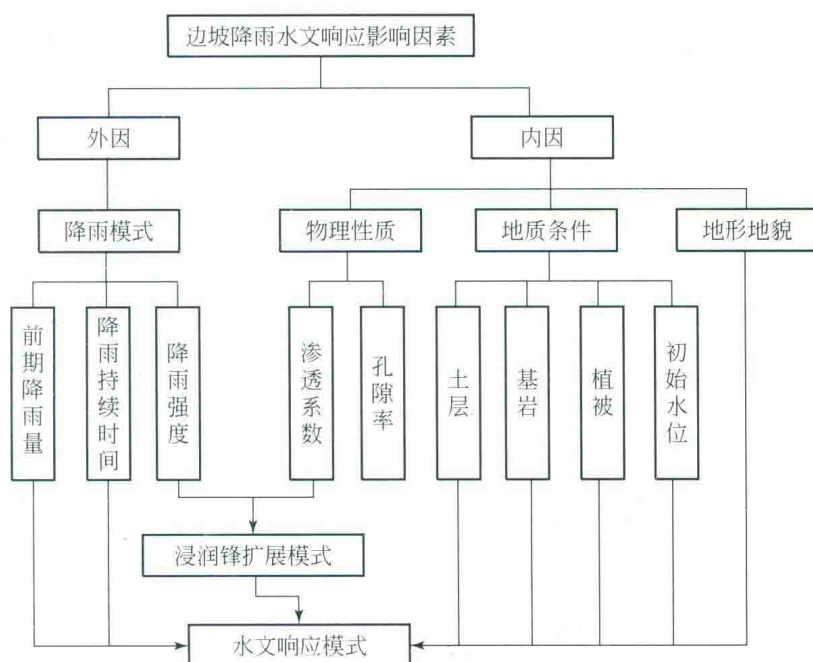


图 1.1 边坡降雨水文响应影响因素

集中于降雨量、降雨强度、降雨持续时间及前期降雨量的影响。

降雨量与滑坡数量有着明显的关系。Au (1993) 针对中国香港地区降雨滑坡统计发现, 一般 24h 降雨量超过 70mm 时就会诱发滑坡, 滑坡烈度随 24h 的降雨强度呈非线性增长, 并且同等降雨强度下市区滑坡烈度大于郊区。Polemio 和 Sdao (1999) 对意大利 Avigliano 降雨与滑坡复活进行了统计分析, 发现 10 ~ 90 天的累积降雨量与滑坡复活都有关系。Ibsen 和 Casagli (2004) 对意大利 Porretta-Vergato 地区降雨滑坡统计发现, 降雨模式与滑坡数量有着明显的关系, 以 6 个月为周期, 降雨量的急剧增加和滑坡数量的急剧增加有着直接的联系。

降雨强度和降雨持续时间会影响边坡的水文响应过程, 从而影响滑坡的类型, 降雨强度小、降雨持续时间长多诱发深层滑坡; 降雨强度大、降雨持续时间短多诱发浅层滑坡 (Keefer et al., 1987; Wieczorek, 1987; Sun et al., 1998; Fourie et al., 1999; Iverson, 2000; Ng et al., 2001; Blatz et al., 2004)。强度大、持续时间短的降雨会首先使表层土体达到饱和, 继而失稳, 发生浅层滑坡 (Sun et al., 1998; Ng et al., 2001)。强度小、持续时间长的降雨诱发深层滑坡有两种水文响应过程, 一种是雨水充分下渗到坡体深部, 降低基质吸力, 从而诱发深层滑坡 (Keefer et al., 1987; Blatz et al., 2004); 另一种是降雨入渗过程中, 浸润锋以非饱和形式向下扩展导致坡体含水量增加, 浸润锋过后, 地下水位上升导致坡体含水量第二次增加并达到饱和, 致使边坡失稳 (Orense et al.,

2004; Tohari et al., 2007)。这两种水文响应过程主要是浸润锋向下扩展方式及地下水位抬升方式造成 (Li et al., 2013)。当降雨强度小于边坡的饱和渗透系数时, 浸润锋以非饱和的形式向下发展, 该过程中浸润锋降低的基质吸力不足以引发边坡失稳; 当浸润锋到达地下水位或隔水层以后, 引起地下水位的抬升, 从而导致孔隙水压力上升, 土体有效强度降低, 引发边坡失稳。当降雨强度大于或接近边坡的饱和渗透系数时, 浸润锋以饱和或近饱和的形式向下发展, 导致基质吸力降低过大, 或完全丧失, 引发边坡失稳。

前期降雨量的大小对边坡水文响应的影响程度是研究热点之一 (Keefer et al., 1987; Wasowski, 1998; Ng and Shi, 1998; Glade et al., 2000; Toll, 2001; Leroueil, 2001)。前期降雨量会造成坡体体积含水量增加, 影响边坡降雨入渗的初始状态, 对后续降雨条件下的瞬态渗流场产生影响, 并且前期降雨量的作用会随边坡类型的不同而不同 (Wasowski, 1998)。但 Brand (1995) 指出, 在高渗透系数的材料中, 前期降雨量可能会引起地下水位的上升, 但对地下水位以上坡体体积含水量的变化影响不大。香港在高强度的降雨条件下, 浸润锋以饱和形式向下扩展, 表层坡体因基质吸力大幅降低或完全丧失而发生破坏, 与前期降雨量的关系不大。前期降雨量对边坡水文响应影响的大小应视前期降雨量对边坡内部水文地质条件 (如体积含水量、基质吸力或地下水位等) 的影响而定, 是一个对比发展的过程。

1.2.2 地形地貌

不利的地形地貌不仅会导致地表水的汇流集中, 坡面形成较高水头, 影响降雨下渗速率, 形成高孔隙水压力 (Wieczorek, 1987; Montgomery and Dietrich, 1994; Tarolli et al., 2008), 还会因坡度、坡形及渗流过程中渗透力的方向等, 影响边坡不稳定区的分布 (Reid and Iverson, 1992)。坡越陡, 雨水就越容易从坡表面流走, 因而一定深度土体的饱和所需的降雨强度越大、降雨持续时间越长 (Fourie et al., 1999)。Picarelli 等 (2004) 发现在雨季, 雨后滑坡体上部孔隙水压力增长较下部快, 并且滑坡体上部的变形也比下部的大。

1.2.3 地质条件

边坡地形地貌和降雨模式主要影响了边坡表面的汇流、径流及积水, 地质条件主要影响地下水的渗流、孔隙水压力的变化及浸润锋的扩展。地质条件对降雨滑坡的影响主要是研究上覆土层、基岩、植被及初始地下水位等对降雨入渗条件下水文响应的影响 (Wieczorek, 1987; Terlien, 1997; Zhang et al., 2000; Leroueil, 2001; Wang and Sassa, 2001; Take et al., 2004; Sidle and Ochiai, 2006; Tarolli et al., 2008)。

上覆土层的厚度、相对深度、各层的相对透水性及坡面的位置等都会影响降雨条件下边坡的水文响应过程 (Wieczorek, 1987; Wang and Sassa, 2001)。对于层状边坡, 由于相对不透水层的边界问题, 雨水渗透到渗透性强的地层时, 会优先在该层内部向下渗透。如果该层倾斜且底端封闭, 雨水会快速渗透到该层底部, 当底部渗入量大于渗出量时, 会局部产生瞬态的高孔隙水压力 (Take et al., 2004)。

基岩面形态和基岩内发育的结构面等会影响降雨入渗条件下雨水的渗流方向、浸润锋的扩展及边坡的饱和渗流方式。斜坡上部出露的基岩透水性弱时, 会使雨水经基岩汇流于斜坡下部 (Tarolli et al., 2008); 当出露的基岩裂隙发育, 透水性强时, 雨水会经基岩快速渗入坡体内部 (Jiao et al., 2003; Li et al., 2016)。当坡体内存在结构面时, 结构面会导致地下水的侧向渗透, 限制了浸润锋向下进一步扩展, 侧向增加土体的含水量 (图 1.2) (Zhang et al., 2000; Leroueil, 2001)。

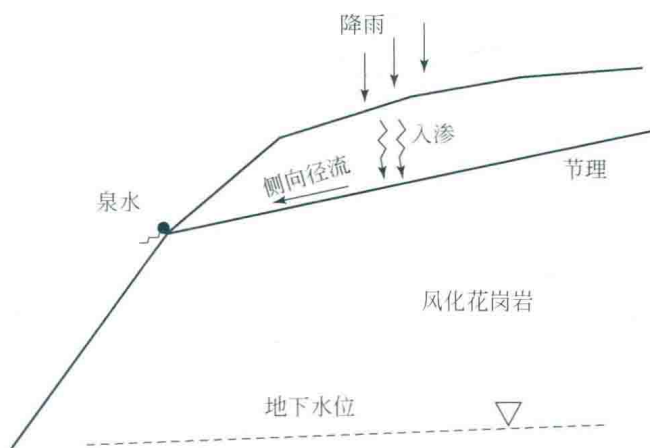


图 1.2 节理对渗流的影响示意图 (Zhang et al., 2000)

1.2.4 物理性质

土体的物理属性, 如渗透系数、体积含水量、孔隙率、密度等, 都会影响降雨入渗过程及边坡水文响应时间 (Stoutjesdijk et al., 1998; Sidle and Ochiai, 2006)。

渗透系数是影响降雨条件下边坡水文响应的一个重要内因, 它与降雨模式 (特别是降雨强度) 相结合, 直接影响边坡地表径流及瞬态基质吸力、孔隙水压力的分布 (Sun et al., 1998; Zhang et al., 2004; Li et al., 2013)。渗透系数与降雨强度的关系影响了浸润锋的发展方式, 当降雨强度不小于饱和渗透系数时, 浸润锋以饱和的形式向下发展, 反之则以非饱和的形式向下发展, 从而对基质吸

力和孔隙水压力的分布产生不同的影响 (Sun et al., 1998)。当土体渗透系数小而储水能力大时, 基质吸力需要相当长的时间去消散, 因而即使是在地表流量大于或等于饱和渗透系数的情况下, 基质吸力还可以维持比降雨长的时间 (Zhang et al., 2004)。在浅表层, 渗透系数越小, 基质吸力降低越快; 但对深部而言, 渗透系数越小, 雨水渗透到深部所需的时间越长 (Cho and Lee, 2001)。Li 等 (2013) 通过数值模拟指出降雨特征 (降雨强度与降雨持续时间) 与土体的饱和渗透系数控制着降雨入渗的形式与地下水位抬升的方式, 从而影响浅层滑坡失稳的时间、深度、模式等。

渗透系数与瞬态渗压场也有着直接的关系。渗透系数的变化会改变渗压场, 即使小的渗透系数变化也会显著地改变渗压场, 并且不同大小的渗透系数改变渗压场的方式相似 (Reid and Iverson, 1992)。当存在渗透系数不同的地层时, 入渗过程中会产生大的水力梯度, 并且可以在渗透系数小的地层中产生大的渗透力 (Reid and Iverson, 1992)。

有效孔隙率 (ESP) 是指饱和体积含水量与残余体积含水量的差值, 它代表了单位体积土体的最大排水能力, 对孔隙水压力的升降时间影响较大 (Mukhlisin et al., 2006)。有效孔隙率大, 表明排水能力强, 孔隙水压上升较慢。

1.3 降雨条件下流滑起动过程研究

降雨对边坡稳定性的影响主要有两个方面, 一方面是增加下滑力, 如降雨会增加坡体的容重、旋转主应力轴、改变应力场 (Reid and Iverson, 1992; Crosta and Prisco, 1999; Picarelli, 2000); 另一方面是降低抗滑力, 如降雨入渗不仅会引起基质吸力减小或丧失、孔隙水压力增加, 致使土体有效强度降低, 还会由于浸泡等软化作用降低土体抗剪强度 (Ng and Shi, 1998; 吴宏伟等, 1999; Leroueil, 2001; 黄润秋和戚国庆, 2002; 程强等, 2004; Aleotti, 2004; Blatz et al., 2004; 叶四桥等, 2006)。

1.3.1 边坡应力状态降雨响应

土体中的力是由重力等体力和孔隙水压力等面力组成的, 这些力决定着土体的应力状态。

对于饱和土, 降雨致使应力状态变化主要表现在两个方面:

- (1) 降雨入渗过程中, 渗透力会旋转主应力轴, 特别是坡脚部位的主应力轴, 从而影响边坡的破坏势 (Reid and Iverson, 1992);
- (2) 降雨强度过大时, 坡面会受到冲刷, 改变坡体的强度、刚度及应力场, 致使边坡失稳 (Crosta and Prisco, 1999; Picarelli, 2000)。

对于非饱和土,坡体应力状态的变化主要受浸润锋扩展方式的影响。Fredlund 和 Rahardjo (1997) 认为可以用三个应力变量 $(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$ 和 (u_a) 描述非饱和土的应力状态。一般假设土粒和水为不可压缩的 (u_a 取 0, 是因为坡体是开放系统, 与大气相通), 则应力变量 u_a 可以取消, $(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$ 就成为非饱和土的应力状态变量。

以地下水位上方某点 (设为点 A) 为例, 当浸润锋以非饱和形式向下扩展时, 在浸润锋到达 A 点前, A 点的总应力不断增加 [图 1.3 (a)、(b)]; 当浸润锋通过 A 点, 而地下水位未抬升到 A 点时, A 点依然非饱和, 但基质吸力降低, 总应力增加到一定值后不再增加 [图 1.3 (c)]; 当地下水位超过 A 点后, A 点饱和, 基质吸力消失, 正孔隙水压力出现, 总应力随地下水位的抬升再次增加 [图 1.3 (d)]。

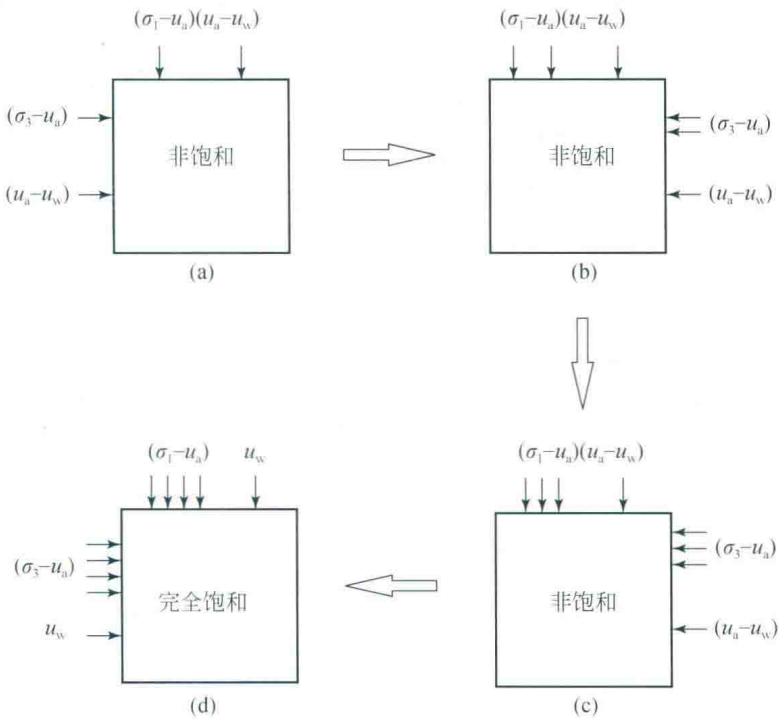


图 1.3 浸润锋以非饱和形式向下扩展时, 地下水位上方某点应力状态的变化

当浸润锋以饱和形式向下扩展时, 在浸润锋到达 A 点前, 边坡的总应力不断增加 [图 1.4 (a)、(b)], 与浸润锋非饱和扩展时的变化相似, 但增量较大; 当浸润锋通过 A 点后, A 点及其以上坡体饱和, 基质吸力消失, 总应力增加到一定值后不再增加 [图 1.4 (c)]; 当地下水位抬升过 A 点后, 正孔隙水压力出现, 总应力保持不变, 有效应力降低 [图 1.4 (d)]。

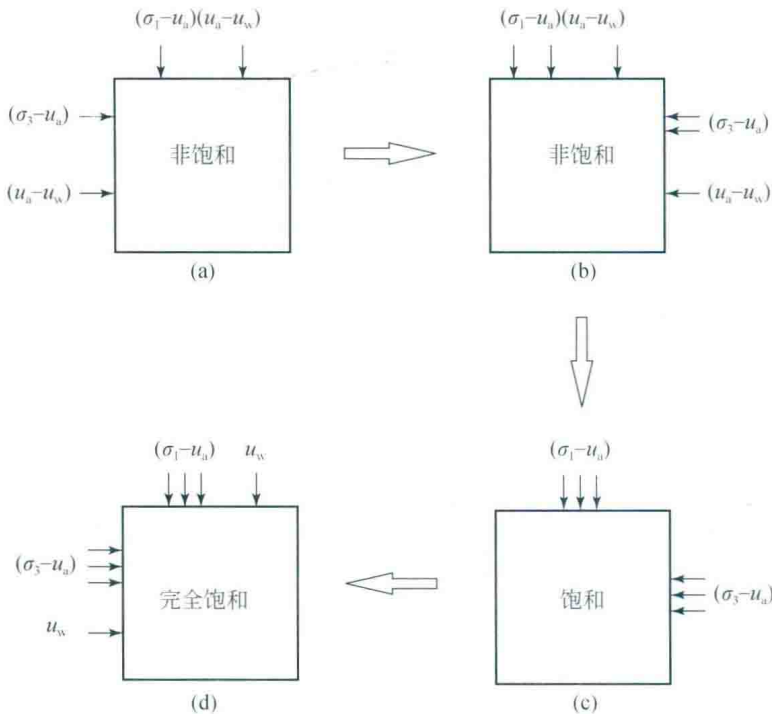


图 1.4 浸润锋以饱和形式向下扩展时，地下水位上方某点应力状态的变化

1.3.2 边坡变形过程降雨响应

土体的应力状态和物理性质是相对独立的两个量，它们共同作用控制着土体的变形与稳定。降雨入渗条件下，边坡的变形模式与坡体的应力-应变关系有着重要的联系 (Dai et al., 1999; 戴福初等, 2000; Chu et al., 2003)。对于剪缩性土，不排水条件下失稳具有突变性，剪切变形致使孔隙水压力迅速增大，强度降低，易高速流动；排水条件下，失稳只发生于平均有效应力减小的情况。对于剪胀性土，降雨条件下，剪胀致使孔隙水压力降低。深层滑坡时，降低的孔隙水压力补充较慢，因而一般为缓慢的渐进变形破坏。滑坡为浅层或表层滑动时，降低的孔隙水压力能够由雨水的快速渗入而得到迅速恢复，致使剪切变形得以持续，尽管其机制上仍为渐进破坏，宏观上也可能表现为突然性破坏。对于临界状态的土，剪切变形致使孔隙比微小变化而维持滑带土处于临界状态，因而表现为缓慢滑动变形。

降雨入渗条件下，边坡破坏过程中，不仅变形有显著的变化，滑面附近的孔隙水压力也会受土的应力-应变的影响，视破坏发展阶段而产生不同的变化。在边坡初始的蠕变阶段孔隙水压力几乎没有响应 (Iverson and LaHusen, 1989)；在破坏前，理想弹塑性或应变硬化性土体会受剪胀或裂隙扩张等影响，滑面附近孔

隙水压力呈现急剧下降 (Iverson and LaHusen, 1989; Harp et al., 1990; Cooper et al., 1998), 剪缩型应变软化土体则会因剪缩产生超孔隙水压力 (Picarelli, 2000; Wang and Sassa, 2001, 2003; Chen et al., 2004); 在破坏过程中, 剪切面位置的孔隙水压力会发生振荡和急剧下降 (Iverson and LaHusen, 1989; Harp et al., 1990; Tohari et al., 2007); 在坡体滑动速率趋于稳定时, 滑带附近的孔隙水压力会振荡上升 (Iverson and LaHusen, 1989)。

1.3.3 流滑机理与起动过程

边坡产生流滑必须同时满足三个条件 (Stoutjesdijk et al., 1998), 分别为液化潜力、不利初始条件和触发条件。液化潜力是指物源必须具备液化潜力, 不利初始条件是指边坡的坡形、初始应力状态等必须处于不利条件, 触发条件是指流滑必须有条件触发生成。

流滑的物源主要有两类, 一类为非黏性材料, 主要有砂土、粉土、火山灰、固体废弃物等; 另一类为黏性材料 (Hung et al., 2001)。Hung 等 (2001) 在流态滑坡分类的综述中, 对这两类材料的流滑条件进行了总结。

对于非黏性材料, 孔隙水压力变化引发的流滑往往发生于一定的物质条件中, 如三角洲水下松散沉积砂, 以及湖相沉积粉土、黄土、松散人工填土 (水力冲填、尾矿、废物填埋场等) 等 (Hung et al., 2001)。在此类物质中, 内部存在易破坏的亚稳态结构且大部分材料含水率高于液限。在初始变形、地震等作用后, 此亚稳态结构破坏, 材料产生液化。液化区的孔隙水压力快速增加, 接近总应力, 致使有效应力过小, 抗剪强度显著降低 (Bishop, 1973; Dawson et al., 1998; Hung et al., 2001)。非黏性材料产生的流滑滑体既可以是饱和的, 也可以是非饱和的。三角洲水下松散沉积砂产生的流滑滑体往往是完全饱和的。粉土、黄土、松散人工填土等产生的流滑滑体大多是非饱和的, 甚至大部分的滑体是干的, 液化仅发生于饱和的底层和表层 (Hung et al., 2001)。

对于黏性材料, 其流滑也是由内部结构破坏引发强度大幅降低。黏性材料流滑多发生于海相沉积或含盐等敏感性黏土或黏质粉土中 (Mitchell and Markell, 1974)。此类黏性材料往往呈轻微或中等超固结状态, 完整条件下不排水抗剪强度较高, 但在结构破坏条件下, 强度大幅降低 (Hung et al., 2001)。黏性材料流滑起动时呈多滑弧溯源性破坏或片状液化破坏, 滑动后滑体为上覆片状或筏状非液化干燥外壳的液态黏土 (Hung et al., 2001)。

边坡流滑的不利初始条件往往与物源的液化潜力有关。边坡形状影响了坡体的应力状态分布, 从而影响了流滑的发生。边坡坡度越陡、坡高越高、密度越低, 产生流滑的可能性也就越高 (Stoutjesdijk et al., 1998)。边坡的形状不仅会影响边坡流滑发生的可能性, 还会影响流滑滑体的体积 (Deangeli, 2007)。