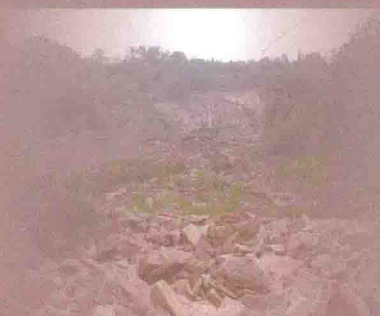




Landslide-Debris Flow Movement
Mechanism under Rock and Soil Mass
and Ground Conditions

岩土体与场地条件作用下的 滑坡碎屑流运动机制研究

樊晓一 等 著



科学出版社

国家自然科学基金 (41272297)

国家自然科学基金 (41401195)

资助

四川省科学技术厅项目 (2014JY0121)

岩土体与场地条件作用下的 滑坡碎屑流运动机制研究

樊晓一等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

灾难性滑坡碎屑流的现场调查和资料分析表明,滑坡碎屑流的运动机制不仅具有体积-高程效应,还显著地受岩土体和下垫面场地条件的作用,其作用机制是滑坡致灾强度和区域的预测、评估以及工程治理需要解决的关键问题。本书从滑坡的岩土体特征和运动的场地条件出发,运用室内土工试验、模型试验、滑坡资料分析、数值模拟分析等方法,研究了岩土体参数和场地条件对滑坡碎屑流运动参数的作用机制。内容包括滑坡岩土体土工试验、滑坡碎屑流运动模型试验、运动参数与影响因素分析、不同场地类型的滑坡碎屑流运动特征分析、滑坡碎屑流运动数值模拟研究和对拦挡结构的运动冲击特征,可为滑坡碎屑流减灾防灾和工程治理提供技术参考和科学依据。

本书可供国土资源、交通、水利水电等部门的地质和岩土工程技术人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土体与场地条件作用下的滑坡碎屑流运动机制研究 / 樊晓一等著.
—北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-050773-0

I. ①岩… II. ①樊… III. 滑坡-碎屑流-运动机制-研究 IV. ①P642.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第278625号

责任编辑:王 运 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:13

字数:300 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

滑坡碎屑流是我国常见的地质灾害，每年导致严重的人员伤亡和财产损失。滑坡碎屑流的运动速度和运动距离是致灾强度和致灾范围的控制参数，而这些运动特征又受岩土体的物质组成和运动场地条件的作用。由于滑源区所处的不同地质环境和地形地貌条件，导致滑坡碎屑流岩土体颗粒级配的差异和运动场地条件的复杂性，以至于许多的研究忽略了岩土体和场地条件对滑坡碎屑流运动参数的影响，仅运用理论方法和数值计算的结果与实际的滑坡碎屑流运动特征存在较大的偏差。

已有的研究表明，无明显受阻滑坡的运动距离、等效摩擦系数与滑坡体积和总能量具有较好的幂律关系，但忽略岩土体力学参数和下垫面场地对滑坡运动的作用，仅从体积或总能量预测潜在滑坡的运动距离和等效摩擦系数会存在较大的误差。滑面液化、气垫效应、碎屑流动虽能对特定的滑坡远程运动机制做出合理的解释，但对滑坡运动距离、等效摩擦系数的定量预测关系却不明晰。因此，滑坡岩土体的物理力学特性、不同下垫面场地条件及其耦合作用对滑坡运动距离的作用是涉及滑坡致灾区域的预测预报及工程防护的关键问题。

滑坡致灾程度取决于滑坡的运动特征，无论是滑面液化、碎屑流动，还是颗粒流理论、块体相互作用等对滑坡高速远程运动特征的解释都是从滑坡岩土体（即内因的角度）特性来阐述其机理，但滑坡启动后的运动特征还显著地受运动路径上下垫面场地条件的作用，即外因的作用。运动场地条件不仅仅表现为对滑坡运动的减速效应，如坡脚型场地上的坡度效应、阶梯型场地上分布的陡坎等。因此，分析滑坡碎屑流运动的控制性因子，可有针对性地对灾难性滑坡碎屑流采取预防措施和工程治理。

本书在国家自然科学基金“岩土体与下垫面对降雨滑坡运动参数的作用机制及主控关系”（41272297）、“岷江上游边坡灾害胁迫下路网脆弱性及其对聚落影响研究”（41401195）、四川省科学技术厅项目“降雨诱发特大型高位滑坡对山区建筑的致灾机制研究”（2014JY0121）的联合资助下，以模型试验、现场调查和收集的滑坡碎屑流数据为基础，利用理论分析、数理统计、数值模拟等技术手段，研究岩土体颗粒级配、不同场地条件下滑坡碎屑流的运动特征。

全书共 12 章, 各章节编写人员及内容为: 第 1 章由樊晓一编写, 主要介绍滑坡碎屑流的研究现状、运动机理、运动参数的研究, 指出研究的特点与不足。第 2 章由曾耀勋、樊晓一、赵运会编写, 进行滑坡模型参数试验, 分析影响岩土体参数的因素, 为后续滑坡模型试验以及数值计算提供基础条件。第 3 章由曾耀勋、杨海龙编写, 分析不同场地条件下的滑坡运动位移、运动速度分布及其滑坡体堆积形态特征。第 4 章由樊晓一、田述军、张友谊编写, 研究不同的斜坡坡度和颗粒级配的岩土体, 对滑坡碎屑流前缘运动速度影响和作用机制。第 5 章由樊晓一编写, 研究体积、颗粒级配和坡度对滑坡碎屑流的坡脚下的水平运动距离、等效摩擦系数的影响及其敏感度大小。第 6 章由樊晓一、张友谊、田述军编写, 基于汶川地震滑坡资料, 分析滑面长度、滑坡坡度、坡脚角度和堆积区坡度 4 个地形因子对不同体积滑坡的运动参数的影响。第 7 章由樊晓一、段晓冬、王海瓜编写, 分析滑坡体积、滑坡落差、坡度条件和偏转角度对坡脚型与偏转型滑坡的运动距离影响。第 8 章由樊晓一编写, 基于未受河流地形显著阻止的典型灾难性滑坡资料, 建立滑坡的水平运动距离与滑坡体积、垂直距离的关系和模型, 评估滑坡堵江的可能性和危险性。第 9 章由樊晓一编写, 分析滑坡的等价摩擦系数、最大水平距离和最大垂直距离与滑坡体积的关系, 得到不同规模滑坡水平、垂直运动的优势距离。第 10 章由樊晓一、田述军、张友谊编写, 通过分析岩性、地震烈度、岩层倾向与坡向的关系和运动场地地形条件 4 个因素对非完全受阻地震滑坡运动距离的影响及其作用机制, 得到场地地形条件是同等规模滑坡运动距离产生差异的最主要影响因素。第 11 章由曾耀勋、樊晓一编写, 通过数值模拟研究滑坡的运动距离、运动速度分布以及堆积体分布形态与场地条件的关系。第 12 章由段晓冬、樊晓一编写, 利用滑槽模型试验和数值模拟研究不同规模、不同坡度下碎屑流冲击挡土墙的土拱效应和拦挡结构不同高度上冲击力的分布变化。

感谢中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所乔建平研究员在本书中部分前期研究给予的项目资助和指导, 姜元俊博士在第 12 章中的滑槽模型试验和数值模拟给予的指导, 西南科技大学的陶俊林教授在模型试验方面给予的协助, 科学出版社对本书出版给予的支持!

由于滑坡碎屑流运动的复杂性、模型试验的相似性问题、滑坡碎屑流的调查和资料收集的完整性等对滑坡碎屑流的运动特征研究都存在一定的影响, 以及限于研究人员自身的专业和研究认识, 本书难免存在不足之处, 敬请指正!

樊晓一

2016 年 9 月 18 日

目 录

前言

第 1 章 滑坡碎屑流运动机理概述	1
1.1 概述	1
1.2 滑坡碎屑流运动机理	2
1.3 滑坡碎屑流运动参数	3
1.4 结论	4
主要参考文献	4
第 2 章 滑坡模型参数试验	7
2.1 室内直剪试验	7
2.1.1 土样制备	7
2.1.2 试验步骤	9
2.1.3 试验成果及分析	10
2.2 直剪试验数值计算	13
2.2.1 PFC ^{2D} 直剪模型	13
2.2.2 粗粒含量对 c 、 φ 值的影响	15
2.2.3 颗粒形状对 c 、 φ 值的影响	19
2.3 结论	22
主要参考文献	23
第 3 章 滑坡运动试验研究	24
3.1 滑坡模型试验	24
3.1.1 试验装置	24
3.1.2 试验内容	24
3.1.3 数据获取	25
3.1.4 典型滑坡运动过程	26
3.2 试验成果分析	28
3.2.1 滑坡前缘速度分布	28
3.2.2 滑坡堆积体分布	32

3.2.3	滑坡运动距离	35
3.2.4	讨论与分析	36
3.3	结论	38
第4章	坡度与颗粒级配对滑坡前缘运动速度作用的试验研究	40
4.1	试验和方法	41
4.1.1	场地坡度	41
4.1.2	材料	41
4.1.3	数据获取	42
4.2	前缘速度	42
4.3	坡度与岩土体对前缘速度的影响	44
4.3.1	坡脚坡度对运动速度的影响 (M3)	44
4.3.2	不同岩土体材料对运动速度的影响 ($\alpha=45^\circ$)	46
4.4	滑坡碎屑流的速度分布	47
4.5	碎屑流运动的能量线模型	49
4.6	结论	49
	主要参考文献	50
第5章	滑坡运动参数与影响因素试验的敏感度分析	52
5.1	滑坡运动参数与体积	52
5.2	坡脚下水平运动距离的影响因素敏感度分析	54
5.2.1	因素对水平运动距离的影响特征	54
5.2.2	水平运动距离的影响因素敏感度分析	55
5.3	等效摩擦系数	56
5.3.1	等效摩擦系数的特征	56
5.3.2	等效摩擦系数的影响因素的敏感度分析	57
5.4	坡度和颗粒级配对运动参数的作用机制分析	59
5.5	结论	59
	主要参考文献	60
第6章	地形因子对滑坡运动参数的影响研究	62
6.1	滑坡的运动参数与地形	62
6.2	滑坡坡度特征	63
6.3	滑坡体积与滑坡运动参数的关系	67
6.4	地形因素对滑坡运动参数的影响	69
6.4.1	滑坡体积 $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \leq V < 10 \times 10^4 \text{ m}^3$	69

6.4.2 滑坡体积 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \leq V < 100 \times 10^4 \text{ m}^3$	72
6.4.3 滑坡体积 $V \geq 100 \times 10^4 \text{ m}^3$	74
6.5 结论	77
主要参考文献	77
第7章 坡脚型与偏转型场地对滑坡运动作用研究	79
7.1 坡脚型滑坡	80
7.1.1 坡脚型滑坡特征	80
7.1.2 未考虑地形影响的坡脚型滑坡运动距离	84
7.1.3 地形因素对坡脚型滑坡的运动距离的影响分析	85
7.2 偏转型滑坡	86
7.2.1 偏转型滑坡特征	86
7.2.2 未考虑地形影响的偏转型滑坡运动距离	89
7.2.3 地形因素对偏转型滑坡的运动距离影响分析	90
7.3 结论	92
主要参考文献	92
第8章 河流型场地的滑坡堵江判别	94
8.1 无明显受河流阻止的滑坡数据	94
8.2 滑坡等效摩擦系数	96
8.3 滑坡水平运动距离的预测	97
8.4 滑坡堵江判别	98
8.5 结论	99
主要参考文献	100
第9章 灾难性地震和降雨滑坡体积与运动距离研究	102
9.1 我国灾难性滑坡概况	102
9.2 滑坡等价摩擦系数	105
9.3 滑坡最大水平距离	106
9.4 滑坡最大垂直距离	109
9.5 结论	111
主要参考文献	111
第10章 非完全受阻地震滑坡运动距离的影响因素及机制分析	114
10.1 概述	114
10.2 地层岩性	118
10.3 地震烈度对运动距离的影响	120

10.4	岩层倾向与坡向夹角对运动距离的影响	121
10.5	场地条件	123
10.6	结论	126
	主要参考文献	126
第 11 章	滑坡碎屑流运动数值模拟研究	129
11.1	概述	129
11.2	滑坡碎屑流 PFC ^{2D} 数值模拟原理	129
11.2.1	力-位移定律	130
11.2.2	运动定律	130
11.2.3	接触本构模型	130
11.2.4	阻尼	131
11.2.5	时步	132
11.3	PFC ^{2D} 滑坡碎屑流模拟	133
11.3.1	滑坡碎屑流数值模拟模型	133
11.3.2	计算工况	135
11.3.3	可行性分析	136
11.4	数值模拟计算分析	140
11.4.1	坡脚型场地条件	140
11.4.2	阶梯型场地条件	144
11.5	东河口高速滑坡-碎屑流运动过程模拟	147
11.5.1	高速滑坡-碎屑流运动模拟机制	147
11.5.2	东河口滑坡运动概况	147
11.5.3	东河口滑坡模拟模型	149
11.5.4	计算结果分析	153
11.6	结论	156
	主要参考文献	157
第 12 章	滑坡碎屑流运动对拦挡结构的冲击研究	158
12.1	滑坡碎屑流冲击实验研究	158
12.1.1	实验材料物理参数	158
12.1.2	实验装置	160
12.1.3	实验设计	161
12.1.4	实验结果与分析	162
12.1.5	挡土墙上的冲击力分布	164

12.2 碎屑流冲击挡墙的土拱效应研究	171
12.2.1 PFC ^{2D} 碎屑流模拟模型	171
12.2.2 计算结果分析	173
12.2.3 碎屑流冲击挡墙的土拱效应	174
12.2.4 碎屑流速度对土拱效应的影响	175
12.2.5 土拱效应的形成特征	176
12.2.6 土拱效应对碎屑流冲击力的影响	178
12.2.7 土拱效应在实际工程中的表现	179
12.3 碎屑流冲击挡墙的影响因素	180
12.3.1 计算工况	181
12.3.2 影响因素类型	181
12.3.3 因素影响结果分析	184
12.4 结论	195
主要参考文献	196

第1章 滑坡碎屑流运动机理概述

1.1 概 述

每年全国都会发生多处降雨诱发滑坡碎屑流的特大地质灾害，造成严重的人员伤亡和财产损失。灾难性的降雨滑坡已成为我国雨季最主要的自然灾害之一，并呈现逐渐增加趋势。在汶川地震灾区，地震诱发了大量的震裂松散坡体，在降雨的诱发下极易发生滑坡^[1]，给灾区的社会经济发展、基础设施建设、人们的生命财产等带来严重的安全隐患。如何才能评估潜在的滑坡可能造成的灾害程度，如何才能进行风险管理以及有针对性的工程治理等，是滑坡减灾防灾迫切需要解决的问题，这就涉及灾难性滑坡的运动参数。滑坡的运动参数决定了其致灾区域和致灾强度，即滑坡运动距离和等效摩擦系数控制着滑坡的致灾区域，滑坡速度和加速度则决定了滑坡的致灾强度。

滑坡的运动包括启动阶段、加速阶段、持速阶段和减速停止阶段。滑坡各运动阶段的速度、加速度以及运动距离，是滑坡减灾防灾措施和工程防护至关重要的技术参数。而已有的滑坡运动参数的计算主要依赖于经验方法和统计分析，以及对个体滑坡的理论分析和数值模拟，其结果不具有广泛推广的应用价值以及对工程实践的指导意义。而对于灾难性滑坡动力学研究，目前国内外提出了众多的模型和理论，涉及滑面液化、碎屑流动、气垫效应等滑坡运动中的固、液、气等诸因素作用机制。但这些作用并不能完全解释滑坡的远程滑动机制，如水是滑坡运动非常有效的液化介质，提高了饱和碎屑流的流动性，是降雨滑坡远程滑动的控制性因素，而地震滑坡的高速远程运动并不具备水的液化作用；碎屑流动不能解释高速远程滑坡-碎屑流的“尺寸效应”以及碎屑流运动过程中动摩擦系数的减小，特别是不能说明滑体质心的运动距离远远地大于预期的滑块；气垫效应并不对所有的高速远程滑坡都有效，只适合空气封闭条件比较好的高速远程滑坡-碎屑流。滑面液化、碎屑流动、气垫效应可为特定的滑坡运动提供合理的解释，但目前的理论解释还不能为滑坡动力学和运动学提供具有广泛应用价值的计算参数和经验关系。

滑坡的运动机制还与下垫面场地密切相关，并且具有两种典型运动特征^[2,3]：
①受河流地形的阻止，滑坡堵塞河道，形成堰塞坝，滑坡的运动参数受河谷地形

的显著制约,如湖北千将坪滑坡、西藏易贡滑坡、贵州岩口滑坡等;②未受河流地形的显著阻止,滑坡的运动在坡体或相对平坦的区域停止堆积,其运动过程得以充分地发挥,常导致严重的人员伤亡、建筑损毁和掩埋,如贵州关岭滑坡、雅安汉源万工滑坡、云南昭通头寨沟滑坡和禄劝烂泥沟滑坡等。其下垫面场地类型包括坡脚型、偏转型、沟谷型、阶梯型等,这些下垫面场地条件对滑坡运动的作用机制影响了滑坡致灾程度的预测、评估以及山区建设场地安全性评价。

滑坡运动具有复杂的机理以及固、液、气的耦合作用,其机制归根结底是滑坡的岩土体和下垫面场地条件耦合作用的结果。进行灾难性滑坡致灾机制所涉及的滑坡运动速度、加速度、距离和等效摩擦系数关系的研究,涉及滑坡碎屑流的岩土体特性和下垫面场地条件两方面的耦合作用的结果,并且滑坡高速远程、近程运动的主控关系是滑坡减灾防灾的关键所在。研究结果对灾难性滑坡运动计算参数的选取、经验关系的确定、防护关键技术、滑坡堵江预测,以及西部山区基础设施安全、人民生命财产安全都具有重要的科学意义和现实意义。

1.2 滑坡碎屑流运动机理

滑坡碎屑流的启程阶段是滑坡运动的基础,已有资料 and 实际考察表明,一些滑坡开始滑动的速度相当缓慢,而逐渐出现高速滑动,称为“缓动式的高速滑坡”;而一些滑坡骤然爆发,迅猛崩滑,一开始便具有相当高的速度,随后又逐渐出现更高的速度滑动,即“剧动式的高速滑坡”。而关于滑坡启程剧动机理主要有:临床弹性冲动加速效应、临床峰残强降加速效应、坡体波动振荡加速效应等三种“加速效应”^[4]。黄润秋、许强等^[5]根据我国20世纪以来的典型灾难性滑坡的总体规律和形成机理,提出了中国大型滑坡发生机理,即滑移-拉裂-剪断“三段”式机理、“挡墙溃屈”机理、近水平地层的“平推式”滑坡机理、反倾向层状岩体中倾倒变形机理、顺倾向层状岩体边坡的滑移(-弯曲)-剪断机理。

滑坡的运动阶段取决于滑坡的总能量,即滑坡体物质的密度、体积与落高之积,如果滑坡运动不明显地受下垫面场地条件的阻止,滑坡的等效摩擦系数很大程度上受控于滑坡体积^[6,7]。灾难性滑坡常具有高速、远程运动特征,其运动机理成为滑坡动力学研究的热点,并取得了丰硕的成果,涉及固、液、气的作用机理^[8,9],空气润滑、颗粒流、能量传递、底部超孔隙水压力等理论模型^[10],以及气垫效应、滑面液化、碎屑流动等作用效应^[5,11-13]。胡广韬认为滑坡行程高速具有滑体势动转化加速效应、滑床气垫擎托持速效应、滑床触变液化持速效应及滑程碎屑流滑持速效应,即一种“加速效应”,三种“持速效应”^[4]。就滑体而言,前后部相互作用是滑坡能够高速远程的另一原因。前缘滑体在进入堆积区时,在

摩擦的作用下呈现短时间的匀速减速运动,而后在后部滑体的推动作用产生相对加速运动,由此滑体后部与前部相互作用的能量转换机制解释了岩崩前缘滑体的远程运动特征^[14-16]。

就目前滑坡高速远程运动的机理而言,空气润滑模型并不对所有的高速远程滑坡都有效。由于滑体下降的过程中,空气是以气泡的形式快速地穿过碎屑体,而在不能被包裹和压缩的滑道上,空气不能有效地液化大型滑坡,只适合空气封闭条件比较好的高速远程滑坡-碎屑流。颗粒流不能解释高速远程滑坡的“尺寸效应”以及碎屑流运动过程中动摩擦系数的减小,对大型高速滑坡的机理研究具有局限性。由于高密度、黏性和不可压缩的特性,水是非常有效的液化介质,提高了饱和碎屑流的流动性,滑体物质孔隙流体的存在可以部分或完全支撑颗粒的荷载,致使有效固体摩擦系数减小,但现场调查的证据表明许多远程滑坡并未达到饱和状态,并且地震滑坡的高速远程运动表明其作用有限。滑体前后部相互作用有效地解释高速远程滑坡碎屑流的“尺寸效应”,但滑坡远程运动并不总是与块体的大规模扩散有关。虽然滑坡远程运动的许多机制在某些确定的滑坡实例中得到了证明,但由于滑坡运动自身的复杂性,到目前为止,还没有一个理论和模型能完全解释滑坡的高速远程运动特征,其运动机制归根结底都是岩土体和下垫面场地条件耦合作用的结果。

1.3 滑坡碎屑流运动参数

滑坡碎屑流的运动速度与距离的预测历来是滑坡减灾防灾的重要研究内容,但由于滑坡发生的不确定性和监测技术的局限性,对滑坡速度的研究主要根据动量传递法、谢德格尔法^[17]、潘家铮法^[18]、非连续变形分析(DDA)^[19]、DAN^[20,21]等理论分析方法和数值模拟。国内学者分别对四川汉源二蛮山滑坡^[22]、贵州关岭大寨滑坡^[23]、云南头寨滑坡^[11]、易贡滑坡^[24]的运动速度进行了理论分析和数值计算。国外学者基于滑坡运动距离模型反演方法分析滑坡最大速度和最大堆积深度的滑坡强度分类等级,提出不同类型的运动距离指标和系统方法^[25]。并运用能量分析方法反演滑坡动摩擦系数,提出地震滑坡运动距离随滑坡体积的增大、原始斜坡坡度的减小而增加^[26]。以及基于动力临界状态线(DCSL)的数值流变模型预测滑坡的诱发条件、滑坡速度和运动距离等^[27]。

运用这些理论分析和数值模拟对滑坡运动速度和距离的分析,都对滑坡运动下垫面场地进行了简化处理,忽略了场地条件对滑坡运动距离、速度的影响^[25,28-30]。理论分析表明滑坡体积与运动距离的预测结果、等效摩擦系数的关系存在较大的离散性^[31],其原因在于不能对滑坡能量和等效摩擦角进行准确的设定,后来的研究运用滑坡前后质心的连线的角度重建了滑坡质心的等效摩擦角与

体积的关系,但同样不能避免其离散性大的特点。数值模型虽然能较好地模拟滑坡在滑道内运动的距离、速度以及与时间的关系^[20,21,32],但其局限性在于假定滑坡在滑道内运动,垂直于滑道的边缘没有摩擦作用,模型的任何特定的位置中的所有滑块的宽度保持不变,忽略体积在滑道沿程变化特征,这样的假设对于陡峭的滑道来说是可以忽略的,但对于宽度相对较大而滑坡运动中又发生路径的改变时,会影响模型的准确性。近年来,国内外学者已经意识到滑坡运动的地形条件对滑坡、运动距离以及堆积体特征的影响^[33-38],试图通过考虑滑坡形状、运动路径的约束条件、地形因素等来减小等效摩擦系数的离散性,然而由于滑坡运动路径的原始地形和下垫面特征、动力学详细数据资料的不足,缺乏斜坡的岩土体、下垫面场地条件等对滑坡运动参数的影响分析,已有的研究仅应用体积和高差作为预测滑坡运动参数是不充分的。

1.4 结 论

综上所述,我们得出如下的结论:

滑坡运动是滑坡岩土体特性和下垫面场地耦合作用的结果,而滑坡运动的岩土体物理力学参数变化都可运用颗粒级配的变化进行描述,下垫面场地条件主要有坡脚条件、偏转角度、沟谷类型、阶梯参数等。通过研究岩土体特性和下垫面场地对滑坡运动速度、加速度的变化规律、运动距离的作用效应,获取滑坡运动学的计算参数和经验关系,可为自然因素诱发的滑坡灾害提供预测、预报方法,并为人类工程活动、社会经济发展引起的地质环境条件变化而导致的滑坡灾害提供符合实际状况的致灾参数,以确保滑坡灾害评估、防护关键技术等措施的合理可靠。

主要参考文献

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (4): 433-444.
- [2] 樊晓一, 乔建平. 坡、场因数对大型滑坡的运动特征影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (11): 2337-2347.
- [3] 樊晓一. 地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (Supp. 2): 31-37.
- [4] 胡广韬. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [5] 黄润秋, 许强等. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] Legros F. The mobility of long-runout landslides [J]. Engineering Geology, 2002, 63: 301-331.
- [7] 方玉树. 高位能滑坡运程探讨 [J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23 (4): 16-20.
- [8] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势 [J]. 山地学报,

- 2007, 25 (1): 72-84.
- [9] 程谦恭, 王玉峰, 朱圻等. 高速远程滑坡超前冲击气浪动力学机理 [J]. 山地学报, 2011, 29 (1): 70-80.
- [10] 张明, 殷跃平, 吴树仁等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (6): 805-817.
- [11] 邢爱国, 殷跃平. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (4): 481-485.
- [12] Deline P. Interactions between rock avalanches and glaciers in the Mount Blanc massif during the late Holocene [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28: 1070-1083.
- [13] 张明, 胡瑞林, 殷跃平等. 滑坡型泥石流转化机制环剪试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (4): 822-832.
- [14] Davies T R, Mcsaveney M J, Hodgson K A. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches [J]. Can J Geotech, 1999, 36: 1096-1110.
- [15] Okura Y, Kitahara H, Sammori T, et al. The effects of rockfall volume on runout distance [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 109-124.
- [16] Manzella I, Labiouse V. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches [J]. Engineering Geology, 2009, 109: 146-158.
- [17] 许强, 裴向军, 黄润秋等. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析 [M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [19] 石根华. 数值流行方法与非连续变形分析 [M]. 裴觉民译. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [20] Kwan J S H, Sun H W. An improved landslide mobility model [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43 (5): 531-539.
- [21] Willenberg H, Eberhardt E, Loew S, et al. Hazard assessment and runout analysis for an unstable rock slope above an industrial site in the Riviera valley, Switzerland [J]. Landslides, 2009, (6): 111-116.
- [22] 许强, 董秀军, 邓茂林等. 2010年7·27四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (5): 609-622.
- [23] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18 (4): 445-454.
- [24] 周鑫, 邢爱国, 陈禄俊. 易贡高速远程滑坡近程凌空飞行数值分析 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44 (6): 833-838.
- [25] Cepeda J, Chávez J A, Martínez C C. Procedure for the selection of runout model parameters from landslide back-analyses: application to the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador [J]. Landslides, 2010, 7: 105-116.
- [26] Kokusho T, Ishizawa N K. Travel distance of failed slopes during 2004 Chuetsu earthquake and its evaluation in terms of energy [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 9: 1159-1169.

- [27] Pastor M, Blanc T, Pastor M J. A depth-integrated viscoplastic model for dilatant saturated cohesive-frictional fluidized mixtures: Application to fast catastrophic landslides [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2009, (158): 142-153.
- [28] 郭爱清, 丁秀丽, 李会中等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (7): 1297-1303.
- [29] 冯文凯, 何川, 石豫川等. 复杂巨型滑坡形成机制三维离散元模拟分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (4): 1122-1126.
- [30] Sassa J, Nagai O, Solidum R, et al. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide [J]. Landslides, 2010, 7: 219-236.
- [31] Hungr O. Rock avalanche occurrence, process and modelling [J]. Earth and Environmental Science, 2006, 49 (4): 243-266.
- [32] Hungr O, McDougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35: 978-992.
- [33] 鲁晓兵, 王义华, 王淑云等. 碎屑流沿坡面运动的初步分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (Supp. 2): 598-600.
- [34] Crescenzo G D, Santo A. Debris slides- rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility [J]. Geomorphology, 2005, 66 : 255-276.
- [35] Revellino P, Guadagno F M, Hungr O. Morphological methods and dynamic modeling in landslide hazard assessment of the Campania Apennine carbonate slope [J]. Landslides, 2008, 5: 59-70.
- [36] Devoli G, Blasio F V D, Elverhøi A, et al. Statistical analysis of landslide events in central America and their run-out distance [J]. Geotech Geol Eng, 2009, 27: 23-42.
- [37] 李秀珍, 孔纪名. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2010, 42 (5): 243-249.
- [38] Pirulli M. Morphology and substrate control on the dynamics of flowlike landslides [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136 (2): 376-388.

第 2 章 滑坡模型参数试验

斜坡岩土体的力学条件的变化导致斜坡应力集中与迁移，从而致使斜坡在临界状态下失稳启动，并对滑坡的运动过程产生影响。因此本章将通过设计具有对比性的三种不同级配的土样，并利用室内直剪试验测定土样的力学参数 c 、 φ 值，为后续滑坡模型试验以及数值计算提供研究基础。

2.1 室内直剪试验

2.1.1 土样制备

对于试验材料的选取原则，主要参照文献 [1] 的综合性滑坡分类体系方法，其中按照滑体岩性分类，包括块状岩体滑坡、碎裂岩体滑坡、黏性土滑坡、碎石土滑坡、黄土滑坡等。而为探索岩土体力学条件与场地条件对滑坡运动的耦合作用，根据试验目的、方法及条件需对岩土体进行必要的概化，在对典型滑坡事件堆积物的现场调查的基础上（图 2.1），主要概化出粗粒含量占优的碎石类



图 2.1 典型滑坡岩土体特性