



泥石流流体的 流变特性与运移特征

王裕宜 詹钱登 严璧玉 等 / 编著

WANG Yu-Yi JAN Chyan-Deng YANG Bi-Yu

CS | 湖南科学技术出版社

DEBRIS-FLOW RHEOLOGY
AND MOVEMENT

NISHILIUTIDELIUBIANTEXINGYUYUNYITEZHENG



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

泥石流流体的 流变特性与运移特征

王裕宜 詹钱登 严璧玉 等 / 编著

WANG Yu-Yi JAN Chyan-Deng YANG Bi-Yu



湖南科学技术出版社

DEBRIS-FLOW RHEOLOGY
AND MOVEMENT

NISHILIUTIDELIUBIANTEXINGYUYUNYITEZHENG

图书在版编目 (C I P) 数据

泥石流流体的流变特性与运移特征 / 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉等编著.
-- 长沙 : 湖南科学技术出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-5357-8048-5
I. ①泥… II. ①王… ②詹… ③严… III. ①泥石流流体—研究
IV. ①P642. 23
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 039101 号

泥石流流体的流变特性与运移特征

编 著: 王裕宜 詹钱登 严璧玉等
责任编辑: 杨 林
出版发行: 湖南科学技术出版社
社 址: 长沙市湘雅路 276 号
<http://www.hnstp.com>
湖南科学技术出版社天猫旗舰店网址:
<http://hnkjcs.tmall.com>
邮购联系: 本社直销科 0731-84375808
印 刷: 长沙瑞和印务有限公司
(印装质量问题请直接与本厂联系)
厂 址: 长沙市井湾路 4 号
邮 编: 410004
出版日期: 2014 年 3 月第 1 版第 1 次
开 本: 787mm×1092mm 1/16
印 张: 32.5
字 数: 830000
书 号: ISBN 978-7-5357-8048-5
定 价: 68.00 元
(版权所有 · 翻印必究)

内容简介

《泥石流流体的流变特性与运移特征》是一本研究泥石流流体的流变特性和运移特征的专门著作。本书系统地论述了泥石流流体的组成特点和理化性质、泥石流流体的应力特性和剪切稀化现象；泥石流启动应力过冲的突发机理、泥石流规模与频率的自组织临界特性、流变模型和二维演算模式、黏性泥石流流体的阻力特征与流速参数的确定。本书还专门阐述了全球气候变化下的黏性泥石流流体输沙年际特征、极端强降水与泥石流侵蚀输沙的相关性、雨季不同时段泥石流侵蚀产沙特征、泥石流输沙规模年际演变趋势数值模拟。并从泥石流流体流变模型出发，分析了泥石流沟道冲淤变化与危险度的评估、泥石流流体堆积结构及构造特征和堆积坡度、堆积范围等多因子预测模型。本书在进行理论探讨的同时，也注意密切联系实际应用，将泥石流流体的基本特点与高浓度管路输送等应用领域的流变特性相结合，也是一本具有交叉学科性质的专著。

本书可供从事山地灾害、泥沙、土木、水土保持、工程地质、铁路、公路、海洋、煤炭化工等部门的科研人员、工程设计人员和有关大专院校师生参考。

Brief introduction

《Debris-flow Rheology and Movement》 is a specific book that introduces the rheology of debris-flow mixtures and its movement. This book systematically discusses debris-flow sediment composition, physical and chemical properties, stress characteristics, stress-thinning phenomena, the mechanism of stress overshoot for debris-flow initiation, the self-organized criticality for debris-flow magnitude and frequency, debris-flow rheological models and two-dimensional routing models, debris-flow resistance characteristics and velocity parameters. This book also specifically describes the annual sediment yields of debris flows under global climate changes, the correlation between extreme rainfalls and debris-flow sediment yields, the characteristics of debris-flow sediment yields in the different time intervals during rainfall seasons, the numerical simulation for the trend of annual sediment transported by debris flows. This book also presents the variation of sediment erosion or deposition in the debris-flow gullies and the estimation of debris-flow potential hazards in the view of debris-flow rheological models, debris-flow deposition structure and the forecasting models for deposition slope and flooding areas. This book not only focuses on theoretical discussion but also closely relates to the practical application. The basic properties of debris-flow mixtures are also related with the rheological properties of high concentrated flow in pine-lines.

This book is inter-disciplined and can be used as the reference for the researchers, engineers, students or professors in the fields of natural disasters, river sediment transport, civil engineering, water and soil conservation, engineering geology, railway, highway, ocean engineering or mining engineering.

前 言

泥石流作为一种高浓度的固液气相混合流变体，它突然暴发，来势凶猛，破坏力强。自 20 世纪 50 年代以来，世界上许多多山的国家，泥石流灾害频频发生，损失惨重，成为山区主要自然灾害之一。由于我国的地质构造和自然地理环境复杂，泥石流分布广泛、活动强烈、危害严重。随着山区经济日益发展，人类活动日趋频繁，特别是全球气候变暖和强降水极端事件频率的增加，以及大地震诱发的大量次生山地灾害（崩塌、滑坡、泥石流等），致使泥石流危害呈现不断加剧的趋势，严重影响我国山区的经济建设和社会发展。因此，研究泥石流流体应力应变的基本特性和它的活动规律，把握全球气候变化下的区域泥石流年际变化特征和沟道冲淤演变趋势，为制定切实可行的泥石流降雨警戒值的预报模式，有效进行泥石流工程治理的流速参数设计，以及保障山区人民生命财产和社会经济可持续发展等方面都具有十分重要的意义。

泥石流流体与一般挟沙水流不同，它含有大量的固体物质（体积浓度为 30%~82%）。这些高含沙泥石流流体改变了其流体的性质和应力应变的运动特性，给泥石流预测预报和防治工程实施上带来一系列与挟沙水流不同的特殊问题。为了更好地解决这些从生产实践上提出的问题，如通过泥石流流域的铁路（公路）的路基及桥涵建筑物设计等提出的问题，必须对泥石流的固液气相结构和流变机理进行深入研究。人们对固液相流体结构和流变特性的认识，已有百余年的历史，但对泥石流流体固液相流变特性的关注和认识，还是近半个世纪的事。如世界著名专家贝格诺 R. A. (Bagnold) 在 1954 年提出的颗粒弥散力的计算公式，日本高桥保教授在 1978 年提出的水石流颗粒剪切流理论等。特别是近几十年的国际减灾活动，中国、美国、日本和新西兰等国的泥石流专家，将泥石流观测试验与数学模拟相结合，深入开展多方面的探索，推动了泥石流流变学的理论研究。如美国的萨维奇 S. B. (Savage, 1983)、哈尼斯 D. M. (Hanes, 1985) 和曼及尔 J. J. (Major, 1991) 等分别利用大型泥石流流变仪进行泥石流固液相结构流变特性的试验研究；美国圣海伦火山观测站的爱文逊 R. M. (Iverson, 1992) 等人在俄勒冈州制作大型水槽，进行了泥石流从形成、运动到堆积的流变模拟试验研究；美国加州大学帕克莱分校的沈学文和加州地调局陈振隆教授（1990）进行了动态循环水槽的试验研究；新西兰的戴维斯 T. R. (Davis, 1989) 运用大型流变仪和小型循环水槽相结合的试验研究；我国的沈寿长（1998）研制的大型圆环旋转式流变仪，王裕宜（2000）研制的大型平板旋转式泥石流流变仪（ $d_{\max}=15\text{mm}$ ），以及瑞士的施克麦恩 M. (Schatzmann, 2009) 近期开发的旋转球流变仪（ $d_{\text{part}}<10\text{mm}$ ），对含粗颗粒泥石流流体进行应力应变的试验研究等。由于以上这些人的开拓性工作，使得泥石流应力应变的理论不断取得新进展，有助于更深入地了解泥石流流变特性的内在机理。

为了减轻和消除泥石流灾害,我国不少生产部门和科研单位,自20世纪60年代以来,先后在西藏波密的古乡沟、甘肃武都的火烧沟、四川凉山的黑沙河、云南东川的蒋家沟和云南盈江的浑水沟等地,进行了系统的野外考察、定位观测、分析实验和模型试验,积累了大量的资料和数据,对泥石流的基本理论问题进行了深入探讨,使我国泥石流的研究步入世界先进行列。泥石流作为一种高浓度输沙过程所造成的水土流失现象是十分严重的,根据云南东川蒋家沟泥石流的多年观测资料,泥石流的年均径流量高达347万 m^3 ,年均输沙量为651万t,一场泥石流的最高含沙量有时达到2180 kg/m^3 。这样高浓度固液相流体能在坡度不大($j=0.052\sim0.065$)的沟道中高速($v=10\sim18\text{m/s}$)运动,在国内外都十分罕见,因而它为我国开展泥石流流变学的研究提供了得天独厚的优越条件。近几十年来,我国泥石流流变学基本理论的观测研究由原来较零星的阶段,进入了系统分析研究阶段,取得了丰硕的成果。这些成果对于促进泥石流流变体内在机理的研究,泥石流预测预报和防治参数的确定,铁路、公路和管线工程选线,以及相关学科固液相物料水力输送等社会经济的发展都是很有意义的。

该书的作者在国家自然科学基金的资助下,自1989年以来连续开展了以“泥石流结构和剪切强度”、“颗粒在黏性泥石流中的力学作用”、“泥石流堆积过程的力学机理”、“泥石流应力本构关系的现场试验研究”、“泥石流土体启动应力应变特性以及降雨警戒值的研究”等系列项目的观测试验研究。本书总结了作者近40年来在泥石流流变特性方面的一些原创性的观测实验和研究成果。为了使读者能比较系统地了解泥石流流体流变特性和泥石流流变学的全貌,本书还特地选择作者曾在国家自然科学基金成果专著出版基金的资助下,于2001年由湖南科学技术出版社出版的《泥石流流体结构和流变特性》一书为基础,融合了作者最近10多年来的最新研究成果。

泥石流流变学是研究山区陡坡角砾土在自重力和水力的作用下,所产生的随时间发展的形变启动、流动与应力关系的科学。本书采用泥石流流变学与地质工程学、地貌学、水力学、流体力学和沉积学相结合的方法,以云南东川蒋家沟泥石流观测研究站为基地,以国家自然科学基金资助的课题为主,进行探索性深入化研究,并结合相关的泥石流研究课题、南昆线铁路工程选线以及国际合作交流等项课题,开展了大量从泥石流土体变形启动→运动→堆积应力应变的观测实验研究项目。该书的作者在揭示泥石流流体的流变特性,以及泥石流流体的力学机理等方面取得了许多新进展,在观测实验方法上也做出了一些原创性的工作,得到国内外同行的承认和重视,初步形成了独具特色的泥石流流变学。

本书引入了构造应力场理论分析地质构造断裂区泥石流发生、发展的内在因素,以及泥石流启动应力应变自组织临界特性。通过泥石流分类特征值的分析,量化地提出土力型和水力型泥石流水力强度指标的物理意义。并根据成昆铁路北段峡谷区泥石流沟的地貌特点及其暴发泥石流灾情的分析,提出了应该特别重视山区峡谷段泥石流沟的工程地质勘测及桥位选择。该书提出的泥石流有效屈服率的概念,修正了黏性泥石流无量纲平方公式有关参数和贝格诺 R. A. (Bagmold) 的低黏度牛顿介质线性浓度指数的试验结论,将自然界黏性泥石流流变模型与国际三套经典流变试验的平方模型进行了对比分析。同时,利用室内循环动力水槽试验的资料,系统地提出了各种不同

类型泥石流流速分布和二相流演算模式、泥石流触变模式；利用专门研制的大型平板旋转式泥石流流变仪，探讨了黏性泥石流流体应力触变能量与其流速、输沙量关系的应力本构关系。作者根据实验观测还揭示了滑坡转化为泥石流应力应变机理；泥石流的黏弹模量与触变特性；黏性泥石流体的阻力特征与流速参数的确定等。

本书专门阐述了全球气候变化下的黏性泥石流流体输沙年际特征；极端强降水与泥石流侵蚀输沙特征的相关性分析；探讨了暴雨型（西南）泥石流多级降雨警戒值的预报模型，与台风型（中国台湾）泥石流降雨警戒基准值设定，以及对未来气候变化下的蒋家沟泥石流侵蚀输沙趋势的模拟。最后本书分析了泥石流沟道冲淤演变特征；并从泥石流流变模型出发，提出流核比和泥深比概念，通过泥石流堆积粒序特征分析反推泥石流运动特征。本书通过中国云南小江流域和美国科罗拉多河、日本仁淀川的泥石流堆积坡度对比，以及相关的堆积水槽试验，提出了泥石流堆积坡度、堆积范围（危险度范围）多因子预测模型，比以前双因子预测模型有了进一步提高。本书还应用附加孔隙压力消散、应力衰减等试验，正确地解释了泥石流堆积形态与相关因子应力应变的关系。并通过泥石流沟道的冲淤变化特征与危险度的评价，以及山地生态环境脆弱性与山地灾害的相关性分析，以期实现山区可持续发展的生态良性循环。

本书所包涵的全部科研项目在实施过程中，都得到了中国科学院东川泥石流观测研究站全体同仁们的支持和帮助。其中部分科研项目得到清华大学著名泥沙专家费祥俊教授的悉心指导、帮助和鞭策。同时，还得到国际著名泥石流专家的指导和帮助，如日本的高桥保教授；美国的陈振隆教授、斯柯特 K. M. (Scott) 和曼及尔 J. J. (Major) 博士；新西兰的戴维斯 T. R. (Davis) 博士等。

全书共 18 章，大致上可分为 5 部分。第一部分 1~4 章：叙述了泥石流固体颗粒和浆体的物理化学性质和结构组成特点，是全书的基础部分。第二部分 5~7 章：分别叙述了泥石流形成的构造应力状况，泥石流发育区的工程地质选线，泥石流启动应力过冲和突发性自组织临界特性。第三部分 8~12 章：阐述了黏性泥石流流体剪切稀化流变特性和剪切动力流变模型，泥石流触变模式，黏性泥石流体的阻力特点与流速参数的确定。第四部分 13~15 章：专门阐述了气候变化下的黏性泥石流流体输沙年际特征；暴雨型泥石流多级降雨警戒值的预报模型与台风型泥石流降雨警戒基准值设定。第五部分 16~18 章：分析了泥石流沟道冲淤演变特征；泥石流堆积结构特征和泥石流堆积坡度、堆积范围多因子预测模式。本书是由中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所（王裕宜、邹仁元）；中国台湾成功大学海洋与水利工程学系（詹钱登、郭峰豪、李明熹、王志贤）；铁道部第二勘测设计院科研所（严璧玉）；成都理工大学沉积所（刘岫峰）；清华大学水利水电工程系（韩文亮）；西南交通大学土木工程学院地质工程学系（徐文龙）；河北师范大学资源与环境科学学院（田冰）；中国水利水电科学研究院（李昌志）；Anton Paar 流变仪器公司（陈飞跃）等单位的科研、教学人员和流变仪器公司参加编写，各章节主要编写人员如下。

第一章：王裕宜；第二章：王裕宜、邹仁元；第三章：王裕宜；第四章：王裕宜、邹仁元；第五章：严璧玉（5.1, 5.3~5.5）、徐文龙（5.2）；第六章：王裕宜、詹钱登（6.1~6.4），陈飞跃（6.5）；第七章：王裕宜、邹仁元；第八章：王裕宜；第九

章：詹钱登、郭峰豪、王志贤（9.1~9.3），王裕宜（9.4~9.5）；第十章：詹钱登（10.1~10.4），王裕宜（10.5）；第十一章：詹钱登、郭峰豪（11.1~11.3），王裕宜（11.4）；第十二章：韩文亮（12.1~12.2），王裕宜（12.3~12.4）；第十三章：王裕宜（13.1~13.3），田冰（13.4）；第十四章：王裕宜、邹仁元；第十五章：詹钱登、李明熹、王志贤、郭峰豪；第十六章：刘岫峰（16.2~16.4），李昌志（16.1）；第十七章：王裕宜、邹仁元；第十八章：王裕宜。全书由王裕宜、詹钱登负责统稿。

参加本书写作的人员都具有扎实的理论基础，长期坚持野外观测研究和工程勘测设计。在研究工作中始终瞄准学科前沿、勇于创新；以百折不挠的探索精神，相互砥砺、配合默契，共同为发展泥石流学科、减灾和山区经济建设作出点滴贡献。

鉴于作者水平有限，难免会出现谬误之处，恳请读者批评指正。

作 者

2013年8月

目 录

第一章 泥石流流的浓度

- 1.1 泥石流流的浓度 (1)
- 1.2 泥石流流容重的最佳组成和极限浓度 (5)
- 1.3 泥石流流分类与其特征 (10)
- 1.4 云南小江蒋家沟流域泥石流概况 (14)

第二章 泥石流流的颗粒组成特性

- 2.1 颗粒大小和级配分析方法 (23)
- 2.2 泥石流流的颗粒级配和分布参数 (28)
- 2.3 泥石流流颗粒组成的双跃式粒度频率曲线形成机理 (38)
- 2.4 泥石流流的有效颗粒级配 (39)

第三章 泥石流流中的水和附加孔隙压力

- 3.1 泥石流流中水的赋存状态 (44)
- 3.2 泥石流流中水的化学成分 (49)
- 3.3 泥石流流的孔隙度 (51)
- 3.4 泥石流流中的附加孔隙压力 (54)

第四章 泥石流流中的颗粒相互作用和结构

- 4.1 泥石流流中颗粒间的相互作用 (63)
- 4.2 泥石流流中的黏粒颗粒的组成 (66)
- 4.3 黏性颗粒的絮凝特性和细颗粒浆体的絮网结构 (73)
- 4.4 泥石流流粗粒浆体的网格结构和泥石流流的骨架结构 (81)

第五章 泥石流流沟谷的流域特征与构造应力场

- 5.1 泥石流流发育与地质构造的关系 (89)
- 5.2 泥石流流地区的构造应力特征 (97)
- 5.3 泥石流流沟谷的流域特征 (105)
- 5.4 泥石流流易发区和易发度划分指标 (117)
- 5.5 泥石流流发育区的工程地质选线——以东川铁路为例 (124)

第六章 泥石流流变特性与量测

- 6.1 泥石流流变学基本概念 (132)
- 6.2 泥石流流变测量学概况 (137)
- 6.3 各类型流变计的量测原理 (138)
- 6.4 旋转式同心圆黏度计在泥浆测试中的应用 (147)
- 6.5 旋转式球状测量系统在含粗颗粒泥石流流体测试中的应用 (148)

第七章 泥石流土体的应力应变自组织临界特性

- 7.1 泥石流启动的应力应变自组织临界特性 (153)
- 7.2 泥石流土体渗透系数与临界雨强的实验研究 (161)
- 7.3 滑坡转为泥石流应力应变机理的探讨 (167)
- 7.4 坡面侵蚀对不同降水量与雨强响应过程的探讨 (176)

第八章 泥石流流体及其浆体的应力应变特征

- 8.1 细颗粒浆体和泥沙浆体的流变特征 (184)
- 8.2 泥石流浆体的流变特性 (195)
- 8.3 泥石流浆体的剪切稀化特征 (206)
- 8.4 泥石流浆体的黏弹特性 (209)
- 8.5 黏性泥石流流体的应力应变特性 (219)
- 8.6 黏性泥石流流体应力过冲特征与阵性流的形成机理 (225)

第九章 泥石流流变模式

- 9.1 泥石流流变模式 (232)
- 9.2 二维均匀流流速分布与底床剪应力 (238)
- 9.3 粗颗粒对宾汉流体流变特性之影响 (241)
- 9.4 高浓度黏性泥石流的流变模型 (252)
- 9.5 泥石流规模与频率的自组织幂律特征 (256)

第十章 泥石流演算模式和应力本构关系

- 10.1 泥石流演算模式概述 (261)
- 10.2 一相流泥石流演算模式 (263)
- 10.3 两相流泥石流演算模式 (266)
- 10.4 泥石流演算模式应用案例 (267)
- 10.5 黏性泥石流流体应力本构关系 (269)

第十一章 泥石流流体之触变特性

- 11.1 触变特性形成原因及其外显之触变行为 (275)

11.2	触变模式及分析方法	(280)
11.3	颗粒混合浆体的触变特性	(285)
11.4	黏性泥石流流体触变启动应力本构关系	(289)
第十二章 黏性泥石流流体的阻力特征		
12.1	高浓度黏性泥石流流体气体的减阻现象	(297)
12.2	高浓度泥石流流体气体减阻机理分析	(303)
12.3	泥石流浆体的触变唯象模型	(307)
12.4	黏性泥石流流体的阻力特征与流速参数的确定	(313)
第十三章 降水年际变化对黏性泥石流输沙量的影响		
13.1	气候变化下的高频率泥石流输沙年际变化特征	(325)
13.2	20 世纪 90 年代小江流域降水趋势与泥石流输沙量特点	(338)
13.3	极端强降水变化与泥石流输沙特征的相关性	(347)
13.4	气候变化下蒋家沟泥石流输沙趋势的预测	(357)
第十四章 暴雨泥石流综合降雨预报模型		
14.1	不同权重降雨量与泥石流产沙规模的分析	(364)
14.2	雨季不同时段泥石流产沙特征	(372)
14.3	泥石流输沙规模年际演变趋势的模拟	(379)
14.4	暴雨泥石流多级综合警戒值的预报模型	(385)
第十五章 台风型（台湾）泥石流降雨警戒基准值之订定		
15.1	土石流降雨驱动指针 <i>RTI</i> (Rainfall triggering index)	(399)
15.2	土石流发生降雨警戒模式之建立	(406)
15.3	区域性土石流发生降雨警戒值	(410)
15.4	土石流发生降雨警戒模式之验证	(414)
第十六章 泥石流堆积物的组构特征		
16.1	泥石流堆积物的粒度特征和判别模式	(422)
16.2	泥石流堆积物的组构特征	(426)
16.3	泥石流流体中黏粒的显微结构	(430)
16.4	泥石流堆积物中的黏土-碎屑界面结构	(433)
第十七章 泥石流堆积过程的应力特征		
17.1	泥石流流体清浑界面沉降特征	(441)
17.2	泥石流堆积过程的应力衰减和附加孔隙压力消散	(446)
17.3	泥石流沉积粒序的机理分析	(449)

第十八章 泥石流沟道冲淤演变特征及堆积范围

- 18.1 泥石流堆积坡度和堆积形态的野外观测 (459)
- 18.2 泥石流堆积坡度和堆积范围的水槽实验 (466)
- 18.3 泥石流沟道的冲淤特征与危险度的评价 (471)
- 18.4 山地生态环境脆弱性与山地灾害的相关性 (491)

CONTENTS

Chapter 1 Debris-flow Sediment Concentration

- 1.1 Debris flow concentration (1)
- 1.2 Sediment composition and extreme concentration of debris flow (5)
- 1.3 Debris flow classification and characteristics (10)
- 1.4 Debris flows at Jiajiang Ravine, Yunnan (14)

Chapter 2 Property of grain composition of debris flows

- 2.1 Grain sizes and analysis methods (23)
- 2.2 Grain size distribution and parameters of debris flows (28)
- 2.3 Mechanism for the formation of grain size distribution with two leaps
for debris flows (38)
- 2.4 Effective grain size distribution of debris flows (39)

Chapter 3 Water and excess pore pressure in debris flows

- 3.1 Characteristics of water in debris flows (44)
- 3.2 Chemical composition of water in debris flows (49)
- 3.3 Porosity of debris flow (51)
- 3.4 Excess pore pressure in debris flows (54)

Chapter 4 Grain interaction and texture in debris flow

- 4.1 Action between grains in debris flow (63)
- 4.2 Clay composition in debris flow (66)
- 4.3 Condense property of clay particles and condense texture of slurry ... (73)
- 4.4 Network texture of slurry and framework texture of debris flow (81)

Chapter 5 Characteristics of debris flow ravines and geological stress structure

- 5.1 Relationship between development of debris flows and geological
structure (89)
- 5.2 Geological stress structure in debris flow regions (97)
- 5.3 Characteristics of debris flow basin (105)

- 5.4 Classifications for debris-flow occurrence regions and occurrence potential degrees (117)
- 5.5 Geology-based engineering line selection in debris flow developing regions (124)

Chapter 6 Debris flow rheology and measurement

- 6.1 Introduction of debris flow rheology (132)
- 6.2 Introduction of rheological surveying for debris flow (137)
- 6.3 Basic theorems of various type rheometers (138)
- 6.4 Application of a rotation rheometer for slurries (147)
- 6.5 Application of a ball rotation rheometer for a quasi-debris flow (148)

Chapter 7 Stress-strain self-organization criticality of debris flow

- 7.1 Self-organization criticality of debris flow rheology (153)
- 7.2 Debris flow permeability and critical rainfall (161)
- 7.3 Rheological mechanism for landslide transformed to be debris flow
..... (167)
- 7.4 Slope erosion under different precipitation and rain intensity (176)

Chapter 8 Rheological Properties of sediment slurry and debris flow

- 8.1 Rheological properties of fine-sediment slurry (184)
- 8.2 Rheological behaviors of debris flow slurry (195)
- 8.3 Stress diluted behaviors of debris flow slurry (206)
- 8.4 Visco-elastic properties of debris flow slurry (209)
- 8.5 Stress-strain relations of viscous debris flow (219)
- 8.6 Stress-overshooting and mechanism of surge formation of viscous debris flows (225)

Chapter 9 Rheological models for debris flows

- 9.1 Rheological models for debris flows (232)
- 9.2 Velocity distribution and bottom shear stress for two dimensional uniform flows (238)
- 9.3 Effects of solid particles on the rheological parameters of Bingham Fluids (241)
- 9.4 Rheological model for high-concentration viscous debris flows (252)
- 9.5 Self-organization power-law relation between debris-flow magnitude and occurrence frequency (256)

Chapter 10 Debris flow routing models and stress constitutive relations

- 10.1 Debris flow routing models (261)
- 10.2 One-dimensional debris-flow routing model (263)
- 10.3 Two-dimensional debris-flow routing models (266)
- 10.4 Application example of debris flow simulation (267)
- 10.5 Stress constitutive relation for viscous debris flows (269)

Chapter 11 Thixotropic models for debris flows

- 11.1 Formation of thixotropic property and its apparent behavior (275)
- 11.2 Thixotropic model and its analysis method (280)
- 11.3 Thixotropic character of the mixture of slurry and grains (285)
- 11.4 Thixotropic constitutive relation for viscous debris flows (289)

Chapter 12 Resistance characteristics of viscous debris flows

- 12.1 Phenomena of resistance reduction for viscous debris flow due to entrained air (297)
- 12.2 Mechanism analysis on resistance reduction for viscous debris flows (303)
- 12.3 Thixotropy phenomenological model for debris flow slurry (307)
- 12.4 Resistance characteristics of debris flow and determination of velocity parameters (313)

Chapter 13 Impact of rain change on sediment transport of viscous debris flow

- 13.1 Property of annual sediment transport of high frequency viscous debris flow under climate change (325)
- 13.2 Rainfall trends and sediment transport of debris flow in Xiaojiang River basin in 1990s of 20 century (338)
- 13.3 Relationship between debris-flow sediment transport and the change of extreme rainfalls (347)
- 13.4 Forecast of the trend of debris flow sediment transport under climate change at Jiajiang Ravine (357)

Chapter 14 Forecast models for rainstorm debris flows

- 14.1 Relationship between different weighing accumulated rainfall and sediment transport of debris flows (364)
- 14.2 Characteristics of sediment transport for debris flow in different periods of rainy season (372)

- 14.3 Simulation of annual evolvement trend of debris-flow sediment transport (379)
- 14.4 Multilevel rainfall-based warning forecast model for rainstorm debris flows (385)

Chapter 15 A Rainfall-Based Debris-flow Warning Model

- 15.1 Rainfall-based debris flow triggering index (399)
- 15.2 Rain-based debris flow warning model and warning criteria (406)
- 15.3 Regional rainfall-based debris flow warning criteria (410)
- 15.4 Application of rainfall-based debris flow warning model (414)

Chapter 16 Composition structure of debris flow deposition

- 16.1 Grain composition of debris flow deposition (422)
- 16.2 Composition structure of debris flow deposition (426)
- 16.3 Micro-structure of clay in debris flow deposition (430)
- 16.4 Texture in boundary between clay and fragments in debris flow deposition (433)

Chapter 17 Stress characteristics of deposit process of debris flow

- 17.1 Settling property of boundary between water and slurry (441)
- 17.2 Stress attenuation and pore pressure reduction in debris-flow deposition process (446)
- 17.3 Mechanism of sediment-graded bedding formation in debris flow deposition (449)

Chapter 18 Erosion and deposition of debris flow gully and deposition area

- 18.1 Field investigation of debris-flow deposition slope and shape (459)
- 18.2 Experimental study on debris-flow deposition slope and shape (466)
- 18.3 Characteristics of erosion and deposition in debris flow gully and the evaluation of debris flow hazard (471)
- 18.4 Relationship between the eco-environmental vulnerability and disasters in mountainous areas (491)