



· 水利学科学术著作丛书 ·

泥石流运动机理与灾害防治

Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow

费祥俊 舒安平 著



清华大学出版社





· 水 利 学 科 学 术 著 作 丛 书 ·

泥石流运动机理与灾害防治

Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow

费祥俊 舒安平 著



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书由三大部分内容组成:泥石流基本特性、泥石流运动机理和泥石流灾害防治。书中在总结分析前人研究成果的基础上,通过对河流动力学、河床演变、两相流、悬液流变学及地学等学科的相互交叉渗透,系统地阐明泥石流的基本特性、运动规律以及灾害防治措施,而且列举了许多实例和工程常用参数的计算方法,特别注重密切联系实际,具有很强的针对性和实用性。

本书既可供国土资源、水利、交通、铁道、环保、建设等部门的工程技术人员和有关科研院所的研究人员参考使用,也可供大专院校水利水电、资源环境、水土保持及地学等有关专业的师生阅读或作为参考教材使用。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

泥石流运动机理与灾害防治/费祥俊,舒安平著. —北京:清华大学出版社,2004

(水利学科学术著作丛书)

ISBN 7-302-07970-6

I. 泥… II. ①费… ②舒… III. ①泥石流—运动(力学)—研究 ②泥石流—灾害—防治—研究 IV. P642.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 003403 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:汪亚丁

文稿编辑:梁广平

版式设计:刘祎淼

印 刷 者:北京中科印刷有限公司

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:165×240 印张:19.5 字数:343千字

版 次:2004年6月第1版 2004年6月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-07970-6/TV·40

印 数:1~3000

定 价:42.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

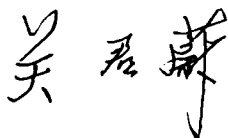
序 一

泥石流是一种典型的固液两相流,也是一种常见的山地灾害,每年造成的经济损失和人员伤亡均很大,泥石流一旦成灾还可能破坏区域生态环境平衡,加剧水土流失及荒漠化进程,影响十分深远。特别是在当前我国全面建设小康社会过程中,伴随着城市化进程和经济建设向山区的延伸发展,山区泥石流的危害性日益引起了人们的重视,如何兴利除害、有效防治泥石流已成为学术界普遍关注的重要课题。

《泥石流运动机理与灾害防治》一书全面系统阐述了泥石流基本特性、运动机理、灾害防治措施等,结构合理,内容丰富,定量化分析自成体系。首先,根据泥石流物质组成与形成特点,将泥石流分为泥流、粘性泥石流和水石流三大类;其次,通过分析现场和室内试验资料,系统论述不同类型泥石流的物质组成、形成原因、流动及堆积特点;以此为基础,根据河流动力学、河床演变学等多学科理论,对各类泥石流的运动机理进行定量化分析,取得了泥石流运动流速、阻力坡降、流量和输沙浓度等特征参数的定量公式和研究成果。鉴于泥石流问题本身的复杂性,尽管这些尝试性成果尚有待于进一步完善,但无疑在前人的基础上有所突破,特别是在非均质粘性泥石流运动流速与阻力等方面具有明显创新。此外,本书强调研究成果的实用性,在泥石流防治方面,不仅吸收国内外在泥石流防治方面的先进经验技术,而且系统地介绍了泥石流防治的工程措施,同时注重泥石流防治生物措施的长期综合效益,对解决我国西部大开发和开发建设项目中遇到的泥石流问题具有很重要的现实意义。

本书付梓之前,有幸得先阅读的机会,深受启迪,愿为之序。

中国工程院院士



2003年5月

序 二

土石流は中国において主要な災害原因であり、その防治は中国山間地帯の経済発展の死命を制する緊急かつ重要な課題となっている。日本でも、都市への人口集中によって、都市周辺の山麓・山間部の開発が進行しつつあり、土石流危険渓流が年々増加し、現在では79,000以上に達している。ここで土石流危険渓流というのは、その渓流で発生した土石流によって被害を受ける可能性のある家屋が5戸以上、あるいは公共施設があるという限定つきで指定されているもので、その他の土石流を発生する可能性のある渓流は、もちろん、はるかに多い。また、最近の地球温暖化の影響かも知れないが、時間雨量が100mmを越すような豪雨が頻繁に起こるようになり、土石流災害がほとんど毎年生じている。さらに、イタリア、スイス、カナダ、米国、南米各国、中央アジア各国、インドネシア、ベトナム等、土石流災害頻発地帯は地球上に広く分布している。而して、土石流の研究、とくにその基本的な機構と災害防治の研究は世界共通の重要課題である。

従来、土石流に関する研究は、各研究者の身近で起こっている土石流を対象として、その研究者が得意とする手法(水理学、土質力学、地質学、地理学、等)を用いて、個別に進められ、種々のモデルが提唱されている。そして、それぞれの研究者が自己の正当性を主張して、噛み合わない議論が行われてきたきらいがある。中国と日本での本格的な土石流研究はほぼ時を同じくして始まったが、土石流の流動機構に関しては、日本では主として石礫型土石流(水石流)を対象とし、中国では粘性土石流(泥石流)の研究が行われてきた。1982年に京都大学防災研究所の創立30周年を記念して開催された講演会において、中国科学院成都地理研究所の丁錫祉所長から蒋家溝の土石流のフィルムを見せられ、従来筆者が想定してきた土石流像と大いに異なっていることに強い印象を受けた。種々の土石流理論

がどのような土石流を対象としているのかを明確にすることの大切さを示している。

今般、中国における土石流研究の権威である費祥俊教授、および新進気鋭の舒安平博士によって本書が上梓されることになった。本書は、中国が広大な地域を占めるが故に生ずる多彩な土石流を分類し、国外での研究状況をも広く渉獵して、体系的な取り纏めを行い、さらに実用性を強く意識して防治の具体的手法にまで詳しく言及されている。まことに時宜を得た内容であることをお祝い申し上げ、また、労苦を厭わず出版に漕ぎ着けられたことに敬意を払うと同時に、土石流研究を志す研究者・学生は勿論のこと、技術者にも大いに参考になることを確信して、一読を薦める次第です。

日本京都大学名誉教授
前防災研究所所長

高橋 保

2003 年 5 月

序二 (中文版)

泥石流作为中国主要自然灾害形成原因之一,其防治已日益成为制约山区经济发展的紧迫而重要的课题。在日本,随着人口集中向城市迁移,城市周边山地正在不断被开发利用,由此造成危险泥石流沟数目逐年增加,迄今已达 79000 余条。这里所说的危险泥石流沟是指,发生泥石流时可能造成被害房屋达 5 栋以上,或者对指定的公共设施造成破坏的泥石流沟。当然其他类型的泥石流沟就更多了。另外,也许是受最近地球温室效应的影响,降雨强度超过 100mm/h 的暴雨频繁出现,几乎连年引发泥石流灾害,在意大利、瑞士、加拿大、美国、南美各国、中亚各国、印尼和越南等国家也是如此,表明泥石流在世界范围内分布极为广泛。因此,对泥石流问题进行研究,尤其是对其基本机理及灾害防治措施的研究一直是全世界共同关注的重要课题。

以前,人们对泥石流的研究往往以其身边发生的泥石流作为对象,应用各自擅长的水力学、土力学、地质学、地理学等学科知识在泥石流的某一方面取得进展,因而提倡应用各种不同的泥石流模型。于是,各研究者都主张自己见解的正确性,观点不一的争论时有发生。中国和日本几乎同时开展泥石流的研究工作。对于泥石流运动机理的研究,日本侧重于以石砾型泥石流即水石流作为对象,而中国则主要以粘性泥石流即狭义泥石流作为研究对象。1982 年在召开京都大学防灾研究所成立 30 周年的纪念演讲大会上,中国科学院成都地理研究所丁锡祉所长展示了蒋家沟泥石流的照片,与此前笔者想象的泥石流的情景大不相同,对此留下了深刻的印象。应该说,各家泥石流理论因明确了以某种特征的泥石流作为对象而显示出各自精华之所在。

本书是中国泥石流学术权威费祥俊教授和年轻学者舒安平博士共同撰写的专著。书中对分布于中国辽阔地域的各种各样泥石流进行了分类论述,

广泛涉猎国内外的研究现状,从而全面系统地归纳分析泥石流运动机理与灾害防治措施,特别注重研究成果的实用性、定量化和具体的应用方法。全书创新之处颇多,内容十分丰富。作者不辞辛劳终于使本书得以出版,在此以表敬意的同时,确信对有志于泥石流研究的学者、学生及工程技术人员会有很大的参考价值,特意为之推荐。

日本京都大学名誉教授

前防灾研究所所长

高橋 保

2003年5月

前言

我国是一个泥石流频发国家,尤其是在西北与西南地区,每年因泥石流造成的经济损失及人员伤亡均很大。泥石流作为一种常见的山地灾害,不仅以惊人的动力作用给山区及河谷地貌造成不同程度的破坏,而且泥石流冲积扇还可将耕地演变成荒废的沙石滩地,对区域生态环境造成极大的不良影响。泥石流汇入主河道,还可能形成天然坝和堰塞湖,顷刻之间使河床地貌发生沧桑巨变,同时潜伏着再次暴发溃决性泥石流的危险。泥石流的危害具有“来势迅猛、影响深远”之特点,因而一直为学术界和工程界所关注。

建国以来,特别是随着最近二十多年来我国经济的快速发展以及西部大开发与生态环境的恢复建设,对崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害及环境问题的研究倍受重视,迄今已有不少研究成果和专著问世。但严格地说,与泥石流治理关系最为密切的实用性成果并不多见。一本将前人成果和最新研究成果融为一体的,注重解决实际问题的泥石流书籍,不仅为工程实践所急需,而且也是西部大开发和生态环境规划建设的需要。正是出于这一考虑,作者才着手撰写本书,但愿本书能够起到“有益资鉴、抛砖引玉”的作用。

本书作者具有多年从事河流泥沙运动力学的教学和科研工作的经验。早在 20 世纪 80 年代初,第一作者与当时的中国科学院成都地理研究所(现中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所)及铁道科学院西南研究所的同行们进行有关悬液流变特性的学术交流时,就开始接触到泥石流问题;此后,又曾多次赴中国科学院东川泥石流观测研究站现场考察和学习研究,作为该研究站学术委员会主任,多次与有关单位一起联合申请和参加有关泥石流的国家自然科学基金课题的研究,从中对泥石流运动机理及治理逐步加深了认识,并成为清华大学泥石流专业的博士生导师。1999 年初,第一作者受聘参加国家自然科学基金重点项目“泥石流与主河相互作用机制研究”(编号 49831010)的开题论证及咨询会,其后与该项目组有关研究人员一起开展了许多合作研究,并在泥石流运动机理及防治方面取得了一批有意义的研究成果。

果,这些研究成果的取得很大程度上充实了本书的内容,使本书具有较高的理论及实用价值。第二作者自1990年进入清华大学攻读博士学位时开始从事高含沙水流和泥石流方面的研究工作,1994年3月博士毕业后赴日本研修多年,对崩塌、滑坡、泥石流等山地灾害及生态环境方面的知识及防灾技术进行了系统地学习研究。由于将国外先进的泥石流防灾技术和实践经验纳入本书,因而使本书内容更加丰富完善。

全书共由3篇18章内容组成。第1篇泥石流基本特性,主要包括:泥石流分类及其成因,运动与沉积特性,固体物质组成与输沙浓度,浆体的流变特性,固体颗粒在水流中的输移运动等,是泥石流运动机理的基础部分;第2篇泥石流运动机理,主要包括:泥石流启动与产生条件,运动理论模型,水石流,泥流与泥石流运动速度与阻力,泥石流的流量计算等,是本书的核心内容;第3篇泥石流灾害防治,主要包括:泥石流灾害及防治现状,泥石流灾害调查与评估分析方法,泥石流防治工程规划设计,泥石流防治的工程措施与生物措施等,是泥石流运动机理的延续和应用部分。

本书既可供国土资源、水利、交通、铁道、环保、建设等部门的工程技术人员和有关科研院所的研究人员参考使用,也可供大专院校水利水电、资源环境、水土保持及地学等有关专业的师生阅读或作为参考教材使用。

在撰写本书的过程中,得到了清华大学水沙学科教育部重点实验室主任、水利水电工程系河流海洋研究所所长王光谦教授和其他同事,以及中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所常务副所长崔鹏研究员等许多同行的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢。另外书中引用了中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、中国科学院东川泥石流观测研究站、中国水利水电科学研究院、铁道科学院西南分院、中国科学院兰州冰川冻土研究所、甘肃省交通科学研究所、云南省地理研究所及云南省东川市泥石流防治研究所等许多单位和同行提供的观测资料和成果,特别是中国科学院东川泥石流观测研究站多年来对我们提供良好的工作条件和各种帮助,对此我们深表谢忱。值得特别感谢的是,中国工程院院士、北京林业大学关君蔚教授以及日本著名泥石流专家、京都大学高桥保教授为本书作序,匡尚富教授级高工、欧国强研究员、唐川教授、康志成研究员、章书成研究员等泥石流专家在百忙之中对本书进行了认真审阅,并提出了宝贵的意见。黄霞和苏菲帮助绘制了书中插图,在此一并致谢。

本书作为清华大学水沙科学教育部重点实验室和中国科学院东川泥石流观测研究站合作研究成果,得到了包括“泥石流与主河相互作用机制研究”(编号49831010)在内的多项国家自然科学基金项目的支持。

限于作者的水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正!

作 者

2003年3月于清华园

常用符号表

A	面积, 系数	G	质量, 单位床面面积上颗粒有效质量
A_s	接触面积	g	重力加速度
a	流核相对厚度, 阻力修正系数	H	水深
a_1	系数	He	赫氏数
a_p	水石流内部阻力因子	h	流深
B	宽度, 系数	h_s	相对淤高
B_s	种子密度	h'	层移层厚度
b	两颗粒中心距与粒径之比、梯形断面底宽、格栅净距	I	水石流颗粒速度综合系数
C	粘结力	J	坡降, 比降, 能坡损失
C_D	阻力系数	J_b	推移运动能坡损失
C_s	种子发芽率	J_k	回淤坡降
D_c	阻塞系数	J_s	悬移运动能坡损失
D_s	种子纯度	k	系数
D, d	粒径	k_s	粗糙度
d_0	粗、细颗粒分界粒径	L	长度
d_{50}	中值粒径	l	混掺长度
d_{90}	上限粒径	M	断面形态参数
E	水流能量	N_p	塑性数
E_A	范德华引力势能	n	颗粒数, 曼宁糙率, 经验系数
E_R	双电层斥力势能	n_c	泥石流综合糙率
F	作用力	P	颗粒组成的质量百分比, 雨量, 动压力, 冲击力
F_A	范德华引力	P_p	离散压力
F_c	颗粒间作用力	p	湿周
F_R	双电层斥力	Q	流量
F, f	Darcy 阻力系数		

Q_b	清水流量	γ_0	清水容重
Q_c	泥石流平均流量	γ_l	浆体容重
Q'_c	泥石流最大流量	γ_m	水沙混合体容重
Q_s	固体流量	γ_s	固体容重
q	单位宽度流量	ϵ	系数,空隙率,介电常数
R, r	半径,水力半径,颗粒半径	ϵ_m	动量交换系数
Re	水流雷诺数	ϵ_y	y 方向的颗粒质量交换系数
Re_d	颗粒雷诺数	ζ	系数
Re'	宾汉体雷诺数	η	刚度系数,塑性粘度
S	含沙量,堆积面积,颗粒间距	η_s	拦沙效率
S_v	体积比含沙浓度	θ	角度
S_{vb}	层移层平均浓度	φ	内部磨擦角
S_{vc}	粗颗粒含沙体积浓度	κ	卡门常数
S_{vt}	细颗粒含沙体积浓度	λ	线性浓度
S_{vm}	极限含沙浓度	μ	粘滞系数
S'_{vm}	层移层底部含沙浓度	μ_0	清水粘滞系数
S_{vmc}	粗颗粒极限浓度	μ_l	浆体粘滞系数
S_{vmt}	细颗粒极限浓度	μ_m	固液混合物粘滞系数
S_{vo}	临界浓度	μ_r	相对粘滞系数
T	粒间离散力	τ	水流剪应力
U	平均流速	τ_B	宾汉极限剪应力
U_w	水石流流体平均流速	τ_c	颗粒磨擦剪应力
U_s	水石流颗粒平均流速	τ_L	层移运动阻力
U_b	清水平均流速	τ_m	边界剪应力
U_c, u_c	悬液不淤流速	τ_p	离散剪应力
u	流速(点流速)	τ_y	屈服应力
u_p	流核区流速	ρ	液体密度,清水密度
u_s	表面流速	ρ_m	固液混合密度
u_{max}	最大流速	ρ_s	固体密度
V	体积	ψ_0	电位
W_c	泥石流质量	φ_0	颗粒内摩擦角
W_s	泥石流石块质量,播种密度	ω	沉速
W_{si}	单位时间入库沙量	ω_0	单颗粒在清水中沉速,临界 d_0 对应的颗粒沉速
W_{so}	单位时间出库沙量	ω_{90}	上限粒径(d_{90})对应的颗粒沉速
X	粗颗粒含量质量百分比	ω_b	单位水体提供能量
α	系数	ω_s	单位水体当地消耗能量
β	系数	ω_t	单位水体传送能量
γ	容重		

目 录

序一	I
序二	III
序二(中文版)	V
前言	VI
常用符号表	IX

第 1 篇 泥石流基本特性

第 1 章 概 论	3
1.1 泥石流纪实报道	3
1.2 泥石流的地区分布	4
1.3 泥石流的基本特点	6
1.4 泥石流研究现状综述	8
1.5 本书写作背景及目的	10
参考文献	10
第 2 章 泥石流分类及成因分析	12
2.1 泥石流的分类	12
2.2 泥石流的成因分析	15
2.3 诱发泥石流的人为因素	19
参考文献	21
第 3 章 泥石流的运动与沉积特性	22
3.1 泥石流运动的一般特性	22

3.2 泥石流运动的不稳定性	26
3.3 泥石流的堆积特性	29
3.4 泥石流沟口堆积扇的试验研究	32
参考文献	34
第4章 泥石流固体物质组成及其浓度	35
4.1 固体物质组成特点	35
4.2 液相输移浓度	39
4.3 液相物质组成与上限粒径	41
4.4 固体物质组成及泥石流最大浓度	44
参考文献	48
第5章 泥石流浆体的流变特性	49
5.1 浆体流变特性	49
5.2 浆体的宾汉极限剪应力	53
5.3 泥石流浆体流变参数的确定	57
5.4 固体颗粒在浆体中的沉降速度	61
参考文献	65
第6章 固体颗粒在水流中的输移运动	66
6.1 水流能量转换及河道过流能力	66
6.2 固体颗粒在水流中的输移运动形式	69
6.3 颗粒运动中的垂向浓度分布	72
参考文献	77

第2篇 泥石流运动机理

第7章 泥石流的起动与形成条件	81
7.1 水石流的起动与形成条件	81
7.2 关于摩擦系数 $\tan\alpha$ 值的讨论	84
7.3 含有细颗粒水石流的起动条件	85
7.4 泥流的形成条件	88
7.5 粘性泥石流的形成条件	92
参考文献	97

第 8 章 泥石流运动的理论模型	99
8.1 研究现状概述	99
8.2 泥石流体的内部作用力	100
8.3 泥石流运动力学模型	103
8.4 两相流应力本构关系	108
参考文献	112
第 9 章 泥石流的运动流速	114
9.1 现有研究成果述评	114
9.2 粘性泥石流流速公式的建立与检验	120
9.3 以粗颗粒为主的泥石流运动速度	125
参考文献	129
第 10 章 水石流的颗粒速度及其计算方法	130
10.1 饱和水石流的颗粒速度	130
10.2 非饱和水石流颗粒速度	133
10.3 水石流颗粒速度的计算方法	137
10.4 细颗粒存在对水石流颗粒速度的影响	139
参考文献	142
第 11 章 泥流的运动速度与阻力	144
11.1 层流状态下泥流运动平均速度及阻力	144
11.2 泥流流态的判别	148
11.3 非均质泥流的不淤流速	151
11.4 非均质泥流的阻力坡降	155
11.5 非均质泥流的运动参数与沟道冲淤	157
参考文献	159
第 12 章 非均质两相流模型及其在泥石流中的应用	160
12.1 非均质固液两相流模型的提出	160
12.2 非均质两相流的内部作用力及其相间关系	161
12.3 非均质两相流模型的基本方程	164
12.4 非均质两相流模型在粘性泥石流中的应用	169
12.5 非均质两相流模型在泥流中的应用	171

参考文献	178
第 13 章 泥石流流量及输沙浓度	179
13.1 泥石流流量的基本特性	179
13.2 泥石流平均流量的计算	180
13.3 泥石流的流量及阻塞系数	181
13.4 泥石流容重与输沙浓度	186
参考文献	188
第 3 篇 泥石流灾害防治	
第 14 章 泥石流灾害影响及防治现状	191
14.1 泥石流灾害概述	191
14.2 泥石流对河道演变的影响	200
14.3 泥石流对区域环境的影响	209
14.4 人类活动对泥石流灾害的影响	210
14.5 我国泥石流灾害的防治现状	212
参考文献	214
第 15 章 泥石流灾害调查与评估方法	216
15.1 泥石流灾害的调查与观测	216
15.2 泥石流的成灾方式与等级划分	222
15.3 泥石流的监测预报系统	225
15.4 基于 3S 技术的泥石流危险度评估	231
参考文献	235
第 16 章 泥石流防治工程规划设计	236
16.1 概述	236
16.2 泥石流防治工程规划	237
16.3 泥石流防治工程的基本设计	242
参考文献	247
第 17 章 泥石流防治的工程措施	248
17.1 泥石流防治的综合工程措施	248
17.2 泥石流的实体拦挡坝	256

17.3 泥石流的格拦坝	257
17.4 泥石流的排导槽	262
参考文献	267
第 18 章 泥石流防治的生物措施	268
18.1 生物措施的类型及作用	268
18.2 泥石流地区生物措施区域规划	272
18.3 生物措施技术与设计	276
18.4 开发建设项目中边坡生物防护措施	285
参考文献	293
结束语	294