

陈洪凯 / 唐红梅 / 马永泰 / 吴四飞

著

公路泥石流 研究及治理

GONGLU NISHILIU YANJIU JI ZHILI



人民交通出版社

交通部重点科技基金资助项目
交通部科技英才专项资金资助

Gonglu Nishiliu Yanjiu Ji Zhili
公路泥石流研究及治理

陈洪凯 唐红梅 马永泰 吴四飞 著

人民交通出版社
2004年1月

图书在版编目 (CIP) 数据

公路泥石流研究及治理/陈洪凯等著. —北京: 人民
交通出版社, 2004.5

ISBN 7-114-05043-7

I.公... II.陈... III.公路路基-泥石流-治理
-研究 IV.U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 032225 号

交通部重点科技基金资助项目

交通部科技英才专项资金资助

公路泥石流研究及治理

陈洪凯 唐红梅 马永泰 吴四飞 著

正文设计:姚亚妮 责任校对:张莹 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:850×1168 1/32 印张:7.75 字数:196 千

2004 年 5 月 第 1 版

2004 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—1500 册 定价:20.00 元

ISBN 7-114-05043-7

内 容 提 要

本书系统地构建了公路泥石流研究及防治技术体系,详细论述了公路泥石流研究及治理的重要意义,全面分析了公路泥石流的形成条件及活动规律,概化了公路泥石流水毁类型,深入研究了公路泥石流体的形成过程以及泥石流对防治结构的冲击和磨蚀作用,开发了速流结构和底埋隧道这两种对大型及特大型泥石流极其有效的防治新技术,开发了泥石流沟固底技术、糙底技术及翼型墩汇流技术等辅助性技术,建立了泥石流抛程计算理论、速流结构设计理念、泥石流两相流流速及冲击力计算理论,建立了速流结构及底埋隧道计算方法,并给出了一些工程实例。

本书对于从事泥石流尤其是公路泥石流研究、设计、治理及养护的科技人员具有重要参考指导价值。本书可作为从事水工结构、地质灾害、水土保持、环境保护、流体力学、减灾防灾及公路病害等方向教学、科研人员的参考用书。

中华人民共和国交通部重点科技基金项目
四川省凉山彝族自治州交通局

项 目 名 称:冲淤变动型沟谷泥石流治理与路基抗毁结构设计
一体化模式研究(编号:95-06-02-33)

主 研 单 位:重庆交通学院

合 作 单 位:四川省凉山彝族自治州公路局

项 目 负 责:陈洪凯 教授 博士 博导

技 术 负 责:陈洪凯教授 唐红梅副研究员 马永泰教授级高工

主要研究人员:陈洪凯 唐红梅 马黑赤和 马永泰 叶四桥

吴四飞 易朋莹 涂德海 贾存忠 张运辉

胡 明 李 强 李兴平 金发均 杨 冕

袁建议 王 蓉 李建军 董建平 翁其能

张雪清 宋小翔 林孝松 关明芳 唐 芬

唐兴利 祝晓寅 周富春

研究报告及专著责任分工

主 编:陈洪凯

撰 著:陈洪凯 唐红梅 马永泰 吴四飞

序

我国是世界上泥石流最发育的国家之一,尤其是西部地区,如西藏、四川、甘肃、新疆、云南、重庆等地,泥石流灾害频频发生,对公路交通造成极其强烈的冲击和水毁作用,导致交通中断。随着我国西部大开发的蓬勃兴起,基础设施建设得到迅猛的发展。严重的泥石流病害已成为西部公路建设及养护中的拦路虎。因而,公路泥石流成因及其防治研究迫在眉睫,成为我国西部公路建设及养护中的重大关键技术问题,并受到政府与工程部门的高度关注。

在这种情况下,陈洪凯教授率领课题组冒着生命危险、不辞辛苦,深入山岭深谷与工程实地,为开创公路泥石流研究新方向与开发防治新技术而四处奔走,辛勤耕耘,为解决日益严重的公路泥石流病害做出了卓越贡献,得到了当地政府与工程部门的肯定。本书就是在课题研究的基础上逐渐形成的,系统全面地分析了公路泥石流形成的条件及其活动规律、水毁类型;深入研究了泥石流对公路防治结构的冲击和磨蚀作用,开发了流速结构和底埋隧道这两种极其有效的防治新技术;建立了泥石流抛程计算方法,两相流流速与冲击力计算理论及流速结构与底埋隧道的计算方法。这些开创性工作有效地解决了我国公路沿线各类泥石流病害,取得了显著的社会经济效益,同时填补了国内空白,丰富发展了泥石流学科体系,总体上达到了国际先进水平。

本书内容新颖,密切结合工程实际,系统介绍了公路泥石流的现状、理论及其防治措施的设计与施工,形成了公路泥石流新研究领域,堪称当前国内此领域的一本力作。

深信本书的出版将使泥石流研究与治理领域的广大科技人员、教学人员深受其益。为此,乐以为之序。

中国工程院院士 郑颖人

2004年 元旦

前 言

我国幅员辽阔、地貌差异显著、地质环境复杂、灾害性气候及气象条件发育,是全球范围内泥石流最频发的国家。西藏、四川、甘肃、新疆、云南、重庆等西部省市区的公路交通建设及养护过程中长期承受着严重的泥石流危害,每年因泥石流造成的经济损失数十亿元。大型及特大型公路泥石流是山区公路沿线普遍存在且破坏作用极其强烈的公路水毁类型,是毁损穿越泥石流沟的公路路基、路面及相应防护结构物的重要外在动力,是造成西部干线公路长时间中断交通最主要的原因。对公路泥石流的全面认识及有效防护是我国公路建设及养护中需要解决的重大关键技术!

鉴于此,在交通部重点科技基金项目“冲淤变动型沟谷泥石流治理与路基抗毁结构设计一体化模式研究”资助下,以四川省凉山彝族自治州及新疆天山的泥石流为研究对象,对公路沿线发育的形态上为沟谷、活动特征大冲大淤、冲击路径变化较大的大型及特大型泥石流进行了全面、深入的研究。现场观测和室内试验相结合,理论和实践相结合,确立了以泥石流发育研究为基础、防治技术研究为手段、工程防治研究为目的的研究原则,从泥石流形成条件及活动规律、泥石流冲击机理、泥石流与路基毁损的耦合作用、泥石流沟基床及岸坡稳定措施、泥石流治理与路基抗毁结构一体化等方面出发,实施项目的全面研究。以确保公路构(建)筑物的安全与稳定、确保公路交通畅通为目标,构建了公路泥石流研究及治理较完备的理论及技术体系。

本项目研究成果通过了以郑颖人院士为主的专家组审查,审查结果认为“课题开创了公路泥石流研究的新方向,开发了公路泥石流防治新技术,为解决日益严重的公路泥石流病害奠定了基础。课题在公路泥石流防治技术研究方面总体上处于国际先进水平”。获得的创新性成果有:

第一,开发了速流结构和底埋隧道两类防治技术,构建了其结

构型式、荷载组合、计算理论及设计理念,建立了泥石流抛程计算理论和“拦渣坝+速流结构”的综合治理模式,开发了固底技术及糙底技术。

第二,建立了泥石流两相流冲击力计算式、泥石流对速流槽的磨蚀力计算式和基于两相流理论的泥石流流速计算方法,进行了泥石流与速流结构的耦合作用研究,得到了耦合作用方程。

第三,将泥石流沟内松散物质分为稳定物源区、较不稳定物源区和不稳定物源区,把泥石流沟内松散物质启动机理分为降雨冲击启动型、强度衰减启动型、冲刷切割启动型和沟床拖拽启动型四类,并系统地建立了其计算方法。

研究成果的推广应用将会有助于比较有效地治理公路沿线大型及特大型泥石流病害,并通过确保公路构(建)筑物的安全与稳定并且消除中断交通而取得巨大的社会、经济及国防效益。

本书由陈洪凯全面负责,第1、2、7章由陈洪凯撰写,第3、4、8章由唐红梅撰写,第5章由陈洪凯、吴四飞撰写,第6、9章由马永泰、吴四飞撰写。书内插图由李强负责清绘。全书由陈洪凯和唐红梅校稿。

本书共分9章。第2章比较全面地分析了泥石流研究的现状及趋势。第3章比较系统地分析了公路泥石流的类型。第4章分析了松散土体的吸水过程及渗透过程,构建了土体吸水蠕变理论,并首次建立了土体吸水蠕变膨胀量计算式、土体强度指标衰减模型,量化了土体强度参数随含水量非线性变化的关系式。第5章基于泥石流的两相流模型建立了泥石流流速计算理论,建立了泥石流两相流冲击力计算式,分析了冲淤变动型沟谷泥石流对沟岸及防治结构的冲击磨蚀机理,建立了泥石流磨蚀力分析式。第6章重点开发了针对特大型泥石流的固底技术和糙底技术。第7章系统深入地研究了对特大型泥石流(冲淤变动型沟谷泥石流)极具排导效果的速流结构的结构型式、分类、计算理论、设计理念及抛程理论等。第8章系统论述了作为有效防治公路大型及特大型泥石流的底埋隧道技术,包括底埋隧道的结构型式、受荷模型,建立了计

算理论。第9章简述了对公路泥石流,尤其是中小型泥石流比较有效的一般性防治技术,包括以控制水源的治水工程、控制土石源的治土工程、排导工程,其中重点论述了拦渣坝和渡槽的设计过程。

在项目研究过程中,参与项目研究的同志齐心协力、精心策划、兢兢业业,以探索的精神去开垦公路泥石流这块处女地。为了获取第一手数据,冒着生命危险穿行在横断山区、天山深谷,借此项目,涌现出多位立志献身祖国公路泥石流研究的有为青年。为此,笔者深深感谢项目研究人员对本项目所作的一切贡献。本专著《公路泥石流研究及治理》是在项目研究报告的基础上撰写的,其署名仅列出了本书撰写的直接参与者。尤其应感谢郑颖人院士等专家在百忙中对研究报告和专著的悉心审核与评议!本专著的出版得到了交通部科技英才专项资金及重庆交通学院优秀人才专项资金的资助,借此致以诚挚的谢意!本项目和专著撰写过程中引用或参阅了大量相关文献资料,谨向文献资料的作者致以深深的谢意!衷心感谢兰州大学李吉均院士、四川大学艾南山教授及中国科学院成都山地灾害与环境研究所刘希林教授对作者在泥石流研究方面所给予的指教!

本科研项目先后得到交通部科教司、四川省凉山彝族自治州交通局、新疆伊犁公路养护管理总段等单位和领导的大力支持与热忱关怀,获得了重庆交通学院院长领导及河海学院、科技处、人事处、重点学科办公室、研究生部、教务处及实验部等各级领导的大力支持与关心,在此一并致以诚挚的谢意!向人民交通出版社的领导及为本专著的出版付出艰苦劳动的同志们致以深深的谢意!

谨以此书献给我的导师——兰州大学的李吉均院士、重庆大学的朱可善教授和中国长江三峡工程建设委员会的哈秋聆教授!

重庆交通学院岩土工程研究所

陈洪凯

2003年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
第一节 公路泥石流研究的目的和意义	1
第二节 公路泥石流研究及防治理念	5
第 2 章 泥石流研究现状及趋势	7
第一节 泥石流学科体系分类及形成条件	7
第二节 泥石流模型	12
第三节 泥石流运动及冲击磨蚀作用	16
第四节 泥石流防治技术及试验	25
第五节 泥石流灾害的评估与预测	34
第 3 章 公路泥石流形成条件及活动规律	36
第一节 公路泥石流分类	36
第二节 公路泥石流形成条件	39
第三节 冲淤变动型沟谷泥石流活动规律	56
第四节 公路泥石流防治技术概要	66
第 4 章 泥石流体形成过程	68
第一节 松散物质吸水蠕变及强度非线性衰减	68
第二节 松散物质启动机理	78
第三节 泥石流体概化模型及参数	90
第四节 泥石流体两相流模型	97
第五节 泥石流体颗粒流模型	103
第 5 章 公路泥石流冲击磨蚀机理	108
第一节 沟谷泥石流运动速度计算理论	108
第二节 泥石流对沟岸的冲击作用	122
第三节 泥石流对防治结构的冲击作用	126
第四节 泥石流对防治结构的磨蚀作用	130
第 6 章 泥石流沟基床及岸坡稳定防治结构	140
第一节 固底技术	140

第二节	糙底技术	142
第三节	护岸结构	144
第四节	导流结构	145
第 7 章	速流结构	148
第一节	结构型式及适用条件	148
第二节	汇流槽动力性能及与泥石流体的耦合作用	150
第三节	速流槽计算理论及设计理念	168
第四节	算例——平川泥石流防治工程	179
第 8 章	底埋隧道	189
第一节	结构型式及适用条件	189
第二节	受荷模式	191
第三节	计算理论	193
第四节	算例——天山公路 K631 泥石流防治工程	200
第 9 章	其他防治结构	206
第一节	分类	206
第二节	拦渣坝	213
第三节	渡槽	220
参考文献		225

第 1 章 绪 论

第一节 公路泥石流研究的目的和意义

泥石流(Debris flow)是高浓度水、砂、砾复合异向混合流,是颗粒大小差异很大的固体(岩土体)和液体(水)的联合运动,其中砂、砾主要按滚动及跃动状态迁移。在小流域内,滑坡和泥石流通常相伴而生、互为因果,具有强烈的冲击、破坏作用。泥石流属于典型的灾害地质现象及地貌过程,是山丘地区公路建设及养护过程中普遍存在且破坏作用极其强烈的公路水毁类型,是毁损穿越泥石流沟的公路路基、路面及相应防治结构物的重要外在动力机制。

由滇北、川西、藏东南、西秦岭山地共同构成的横断山区是我国泥石流发育的强烈地带,制约着境内国道 G108 线、G212 线、G318 线、G319 线及多条省级公路干线的正常营运。新疆独山子至乔尔玛段的北天山是我国西北泥石流集中发育的地区,制约着国道 G217 线的正常营运。山高、谷深、坡陡是横断山区及北天山地区典型的地形地貌特征。泥石流沟口(沉积区)通常是公路的必经之地,此段公路也因此成为公路建设及养护的“瓶颈”地段。如横穿雅砻江河谷地区的西(昌)木(里)路,在平川、金河、小关沟等小流域,泥石流大冲大淤,从 1998 年以来,沉积区在每年的雨季一般要淤高 4~5m,致使 300~400m 长的公路年年被淤被毁,且每年的泥石流冲击路径变动幅度很大,可及 30m 左右,导致泥石流对路基的破坏作用强烈而毁损部位具有明显的不确定性。1998 年小关沟流域内 2km 长的路基全部为泥石流所毁,平川泥石流冲击及掩埋路基致使公路断道 3 个月,直接经济损失超过 2 亿元^[13]。

川藏公路(包括国道 G318 线和 G319 线)沿线就有泥石流沟 1000 余条,先后发生泥石流毁灭灾害 400 余起,每年因水毁灭灾害阻碍车辆行驶时间长达 1~6 个月。其中,左贡段是全线公路水毁最严重的地段,长 80.6km,洪水、塌方、泥石流等水毁使该段成为川藏线“卡脖子”路段,每年因此至少有两个月时间断道,严重制约了进出藏物资的运输,制约了藏东南地区经济的发展及西南边陲的国防建设^[12]。国道 G212 线西秦岭陇南区段,在化马、甘家沟、武都等处均是泥石流极其发育的地段,冲击、淤塞严重,严重影响道路畅通。新疆天山公路国道 G217 线既是新疆西部连接北疆和南疆的惟一干线,也属于重要的国防公路,每年春夏交接季节,冰雪融化、大气降雨,泥石流、崩塌、滑坡及雪崩等公路水毁极其发育。K631、K637、K638、K648 泥石流非常严重,大冲大淤,掩埋路基,在路面上堆积泥石流体厚 40~60m, K702 泥石流阻塞河流形成堰塞湖,湖堤溃决,使 500 余 m 长的路基瞬间消失。据不完全统计的资料表明,在上述泥石流灾害地区,泥石流毁损公路构筑物,导致中断交通总时间占公路可通行时间的 30%~40%。

泥石流是重要的公路水毁类型。例如,新疆天山公路北段发生最大的水毁有三次。第一次是在 1987 年 7 月 13 日下午,一场暴雨,巴音沟—哈克桥地段全线多处发生泥石流、塌方,路基多处被冲断,其中 K614+550 和 K630+900 处路基沿山根全部被冲没。这两处均是半填半挖地段,下面是近百米深的奎屯河谷,路基恢复十分困难,损失严重。K636+300 处堆积泥石流达 2 万多 m^3 ; K637+600 泥石流冲积物达十几万 m^3 ; K648+300 有 3 万多 m^3 ; K642+300 处有一孔径为 13m 的小桥,桥孔被泥石流阻塞,泥石流翻越路面,把停在桥上的两辆三菱大货车埋在桥面上。这次水毁,造成 100 多辆车分别被阻在公路沿线不同的位置。第二次是在 1999 年夏季,气候变化无常,山上气温反差较大,大雨、暴雨发生频繁。6 月 11~13 日, K570~K602 地段,遭受暴雨袭击,多处发生泥石流、塌方,冲毁路基及构造物。7 月 10 日下午, K572~K608 路段,再次遭受暴雨袭击,导致山洪暴发并中断交通。在 K572~K608 共

36km 范围内有 80 余处泥石流、30 余处塌方、路基不同程度被冲毁、4 道涵洞被中断,尤其 K580 一座小桥被冲毁,路边一采石民工房屋被冲塌。K631 + 200 ~ 300 和 K636 + 200 ~ 500 路基整体被毁。K631 + 500 发生特大泥石流,堆积物达十几万 m^3 ,清理十分困难,现过往车辆只能在泥石流堆积体上翻越而行。K637 + 600,当初公路勘测时未判断出该处是泥石流沟,设计时未考虑泥石流的影响,只修建了两个孔径为 4m 的涵洞。后泥石流暴发,涵洞被阻,路面埋没,每当气温高达 25°C 时,山上冰雪大量融化,融雪水下流导致泥石流发生。当遇到高温再加暴雨时,泥石流越发势不可挡,上万 m^3 的泥石流堆积在路面上,阻塞交通,有时一阻就是几日。现路面堆积物已达 5 万 m^3 之多。7 月 10 ~ 16 日,在连续高温和暴雨的双重袭击下,此沟暴发了历年来最大的泥石流。流动轴线达 400m 之长,厚度达 8m,流动时间达 4 天之久。泥石流体和对面山连成一体,像一座石山座落在河中,切断了河流,致使河水迅速上涨。挖掘机在此用了两个月才将河道疏通。K687 喀什河大桥遭特大洪水袭击,大桥的 4 个锥坡、30m 路堤全部被洪水冲没。由于夏天大量的雨水和融雪水侵入岩石缝隙中,冬季冻固,夏季热融膨胀。遇到大雨或暴雨,使山体岩石失去稳定,发生大量的塌方,砸坏路基路面。第三次是在 2001 年 6 月 4 日下午 5:00 时,乔尔玛地带突降暴雨,K702 + 900 路段,遭到泥石流和山体滑坡的双重袭击,沿线左侧发生了巨大的山体滑坡,同时右侧又发生了大规模的泥石流,900m 路段全部冲毁。这次水毁是历史上罕见的,泥石流长 900m、平均厚度 10m、宽 60m,形成了一个巨大的泥石流大坝,横拦在公路、河道上,和对面山连为一体,将河流切断,河水堵塞,水无法流出而形成一湖泊,湖泊水位漫过大坝流出。

三峡库区也有 271 条泥石流沟,其中 100 余条位于公路沿线,近期有活动加剧的趋势。等等。

我国公路每年因泥石流造成的经济损失数十亿元,仅四川境内每年在凉山地区、攀枝花地区、甘孜和阿坝地区由泥石流诱发公路水毁的直接水毁经济损失就在 3 000 万元以上。

综上所述,目前我国公路泥石流病害是相当严重的。把泥石流作为一种公路水毁类型及公路水毁动力已经是交通科技及管理人員的共识。现有相关规范对公路泥石流的防治条款主要有:

《公路路线设计规范》(JTJ 011—94)5.2.5 中“对于滑坡、崩塌、岩堆、泥石流,……严重不良地质地段……,应慎重对待。一般情况下路线应设法绕避。必须穿过时,应选择合理的位置,缩小穿越范围,并采取必要的工程措施”。6.3.1.3“跨越泥石流沟时,应首先考虑在流通区或沟床稳定段设桥跨越,设计时应注意桥型的选择和基础的埋置深度。涵洞易被泥石流堵塞,不宜采用”;6.3.1.4“泥石流地区路基设计应全面考虑排导、拦截以及水土保持等各项措施,应做好总体规划,采取综合防治”;6.3.1.6“对小型坡面泥石流,冲淤不大者,在四级公路标高受限制时可采用过水路面或清淤措施”;6.3.2.1“跨越泥石流的措施包括桥梁、涵洞、过水路面、隧道、渡槽”;5.1.4“沿河路基在水流冲击、淘刷和侵蚀作用下,易造成路基水毁、坡角淘空,或水位骤降时产生管涌现象,使路基内细颗粒填料流失,而导致路基失稳、边坡坍塌。沿河路基的防护,主要针对水流的破坏作用而设”;6.3.2.1“……隧道洞口被泥石流掩埋是最常见的严重病害……”。

严重的泥石流水毁向我们警示,公路部门对泥石流的研究是极其薄弱的,研究缺乏系统性,防治缺乏针对性,尤其是冲淤变动型沟谷泥石流,多数是影响公路正常交通运输的瓶颈地段。泥石流防治是公路建设和养护过程中长期未能得到有效解决的关键技术问题。有效防治泥石流,确保公路构筑物的安全与稳定,确保公路交通生命线的正常运行,是摆在交通科技工作者面前一项艰巨而又迫在眉睫的光荣任务。鉴于此,2000~2003年交通部重点科技基金项目“冲淤变动型沟谷泥石流治理与路基抗毁结构设计一体化模式研究”(合同编号 95-06-02-33)的资助下对冲淤变动型沟谷泥石流进行了深入研究,本书即是基于该项目成果撰写而成的。基于对冲淤变动型沟谷泥石流发育环境及过程的分析,进行泥石

流治理与路基抗毁结构设计一体化模式研究,开发公路泥石流的有效防治技术,具有重要的工程实用价值。其理论价值体现在丰富泥石流学科,尤其是在拓展公路泥石流研究这一新领域。

第二节 公路泥石流研究及防治理念

公路是一种线状构造物,山区公路将穿越不同的地质地貌及气候环境区,对于公路沿线发育的大型、特大型泥石流应按照公路建设、养护及公路交通运输的特别要求而对其进行研究及治理。从公路交通的角度出发,公路沿线的大型、特大型泥石流研究及治理应坚持的理念可概括为四点:

第一,以具有大冲大淤、毁损作用极其强烈的冲淤变动型沟谷泥石流为主要研究对象,重视公路线型与泥石流沟的合理组合,确保公路构筑物的安全与稳定以及交通运输的有序进行。

第二,应坚持以地质灾害防治系统工程方法论为指导,全面认识公路泥石流形成环境,深入研究泥石流发育机理,形成有效治理泥石流的技术体系,遵循以现场调查测试为基础、理论研究为技术依托、防治技术研究为目的的总体研究原则。

第三,重视泥石流沟的物源、岸坡稳定性、泥石流体形成机理、泥石流运动过程、泥石流冲击力及冲击路径、泥石流淤埋规律、泥石流与防治结构耦合作用、防治结构在泥石流作用下的动响应过程、泥石流形成及运动力学、泥石流抛程理论、泥石流冲蚀临界深度、防治结构冲击及磨蚀机理、防治结构抗冲击磨损关键技术等关键问题的研究。

第四,基于综合治理模式的排导技术是公路泥石流防治的关键技术,开发针对大型、特大型公路泥石流的防治技术体系,尤其应加强对速流结构、底埋隧道、糙底技术及翼型墩分流技术等防治机理、计算理论、抗冲击及抗磨蚀的研究,建构其设计理念方程,补充完善相应勘察、设计及施工规范。

公路泥石流的研究技术路线见图 1-1。

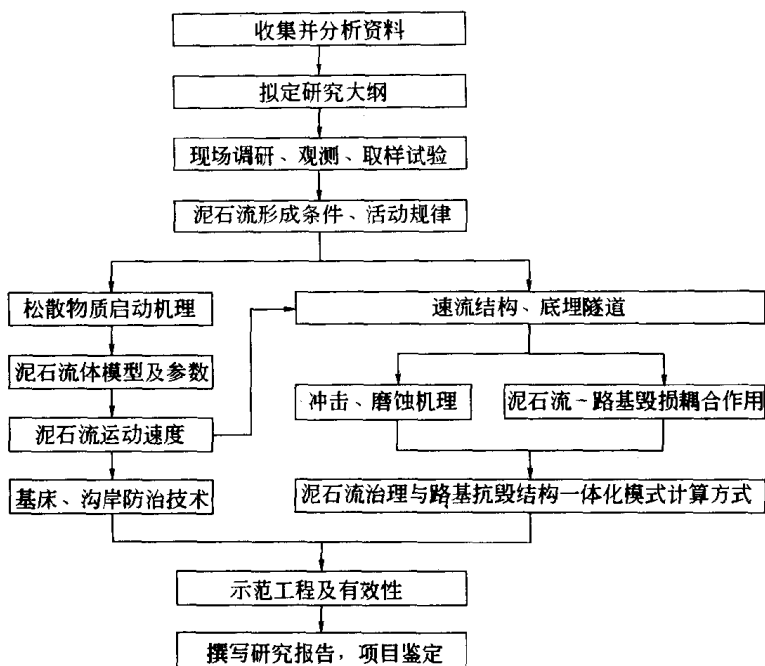


图 1-1 公路泥石流研究技术路线