

NISHILIU DUIJITI SUIDAO GONGCHENG LILUN YU SHIJIAN

泥石流堆积体隧道工程 理论与实践

朱正国 朱永全 吴广明◎著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

NISHILIU DUIJITI SUIDAO GONGCHENG LILUN YU SHIJIAN

泥石流堆积体隧道工程 理论与实践

朱正国 朱永全 吴广明◎著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书内容分为上下两篇。上篇为理论基础篇,内容为泥石流堆积体隧道围岩压力计算方法和衬砌抗震设计理论,包括绪论、压力拱效应研究、基于压力拱理论的围岩压力计算、压力拱理论计算围岩压力方法分析、考虑施工过程的大跨隧道围岩压力计算方法初探和泥石流堆积体隧道衬砌抗震设计,具体见第1~6章。下篇为施工实践篇,内容为泥石流堆积体隧道施工实践,包括隧道加固区范围及方法、隧道施工方法、隧道基底处理技术、隧道施工技术和隧道施工监控量测技术,具体见第7~11章。

本书强调理论与工程实践相结合,可供隧道与地下工程研究、设计和施工人员参考,亦可作为研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

泥石流堆积体隧道工程理论与实践 / 朱正国, 朱永全, 吴广明著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 8

ISBN 978-7-114-11457-1

I. ①泥… II. ①朱…②朱…③吴… III. ①泥石流—堆积—隧道施工 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 118050 号

书 名: 泥石流堆积体隧道工程理论与实践

著 作 者: 朱正国 朱永全 吴广明

责任编辑: 刘彩云 吴燕伶

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.25

字 数: 257 千

版 次: 2014 年 8 月 第 1 版

印 次: 2014 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11457-1

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)



前 言

我国地貌差异显著、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(自治区、直辖市)的铁路、公路等交通设施长期承受着严重的泥石流危害,即使是埋设于泥石流堆积体中,隧道也可能因遭受大型泥石流冲刷而破坏。

长期以来,许多专家、学者针对软岩隧道、黄土隧道、溶洞隧道、岩爆隧道、瓦斯隧道等不良地质隧道进行了深入和系统的研究,取得了丰厚的研究成果,但专门针对泥石流堆积中修建隧道工程方面的系统研究还很少,只有少量文献介绍了隧道穿越泥石流沟的施工技术。因此,解决泥石流堆积体隧道相关科学和技术问题,是该领域工程技术推进发展的需要。

本书内容分为上下两篇。上篇为泥石流堆积体隧道理论基础篇。通过数值模拟分析研究压力拱的传力机理,以弹塑性理论为依据,确定压力拱的影响范围和内外边界。根据压力拱的受力机理研究,确定基于压力拱理论的围岩压力计算方法。对影响围岩压力计算的各因素进行敏感性分析,并运用 MATLAB 软件的多元线性回归计算模块对正交试验结果进行回归分析,得到便于工程实际应用的围岩压力计算公式。考虑施工过程对围岩压力的影响,采用将影响系数添加到基于压力拱理论的单洞泥石流堆积体隧道围岩压力计算公式中,最终得出适用于大跨泥石流堆积体隧道的围岩压力计算公式。提出穿越泥石流体堆积隧道抗震设计应采取的注浆加固方案和设置减震层,并优化了注浆加固和减震层设计参数。下篇为泥石流堆积体隧道施工实践篇。提出穿越泥石流堆积体隧道施工中应采用地表地层、掌子面全部范围注浆加固、施作大拱脚及隧道基底采用树根桩加固等施工辅助措施,并给出加固的范围及方法。结合兰渝线仓园隧道穿越泥石流堆积层这种特殊地质情况和实际施工情况,通过计算分析,在采取相关施工辅助措施后,本隧道选取三台阶七步法施工,并给出三台阶七步法中合理的台阶参数。通过研究隧道基底加固方案在列车振动荷载作用下基底位移和速度随振动时间的变化规律,提出泥石流堆积体隧道基底采用树根桩加固处理技术。最终形成了一整套泥石流堆积体隧道施工工法及工艺。

本书是河北省自然科学基金项目(E2012210011)“土质地层连拱式地铁车站隧道围岩压力与支护参数研究”、河北省高等学校科学技术研究项目(QN20131179)“应力路径对连拱式隧道围岩压力及结构设计计算影响研究”和中交二公局技术开发项目“双线铁路隧道下穿泥石流沟施工关

键技术研究”等研究成果的总结。参加理论、试验研究和本书撰写工作的人员有朱正国、朱永全、吴广明、王成武、崔小鹏、孙明磊、刘灼、余剑涛和张斌等。在此,向所有做出贡献的课题组成员及为本书出版付出艰苦劳动的编辑们致以深深的谢意!

由于时间仓促、水平有限,书中疏漏和不妥之处,恳请有关专家和读者给予批评指正。

作者

2014年3月

目 录

上篇 理论基础篇

第 1 章 绪论	3
1.1 泥石流的分布及特性	3
1.2 泥石流堆积体隧道的定义及工程问题	15
第 2 章 压力拱效应研究	18
2.1 概述	18
2.2 压力拱形成的力学机理分析	18
2.3 压力拱内外边界的确定	19
2.4 基于数值模拟的压力拱研究	19
2.5 小结	30
第 3 章 基于压力拱理论的围岩压力计算	31
3.1 围岩压力概述	31
3.2 现有规范采用的深埋隧道围岩压力计算方法	31
3.3 基于压力拱理论的围岩压力介绍	32
3.4 基于压力拱理论围岩压力计算方法与规范法的比较	32
3.5 小结	35
第 4 章 压力拱理论计算围岩压力方法分析	36
4.1 概述	36
4.2 参数敏感性分析法介绍	36
4.3 各影响因素的敏感性分析	37
4.4 台阶法施工的影响分析	43
4.5 隧道多影响因素的共同分析	43
4.6 小结	47

第5章 考虑施工过程的大跨隧道围岩压力计算方法初探	48
5.1 引言	48
5.2 基于施工过程的计算思路	48
5.3 基本假设	49
5.4 影响系数的确定	49
5.5 大跨隧道围岩压力计算公式的推导	52
5.6 工程实例验证	52
5.7 小结	55
第6章 泥石流堆积体隧道衬砌抗震设计	56
6.1 我国发生的强震情况	56
6.2 地震对隧道结构的影响	56
6.3 注浆加固对泥石流堆积体隧道衬砌抗震设计效果分析	62
6.4 全环间隔注浆加固的参数优化	71
6.5 减震层对泥石流堆积体隧道衬砌抗震设计分析	73
6.6 小结	77

下篇 施工实践篇

第7章 泥石流堆积体隧道加固区范围及方法	81
7.1 泥石流堆积体隧道安全施工的基本原则	81
7.2 常用围岩加固(预支护)技术现状及评价	82
7.3 基底以上地层加固范围及隧道施工力学特性分析	94
7.4 基底地层加固范围及隧道施工过程中力学特性分析	100
7.5 小结	105
第8章 泥石流堆积体隧道施工方法研究	107
8.1 常用隧道施工方法及评价	107
8.2 大拱脚台阶法施工效果分析	110
8.3 其他不同工法施工过程中力学特性分析	115
8.4 工法适用性分析	126
8.5 三台阶七步法合理台阶参数分析	128
8.6 小结	130
第9章 泥石流堆积体隧道基底处理技术研究	131
9.1 常用基底处理方法及评价	131
9.2 泥石流堆积体隧道基底稳定性分析	134

9.3 小结	144
第 10 章 泥石流堆积体隧道施工技术研究	145
10.1 概述	145
10.2 施工流程及操作要点	145
10.3 工艺原理及工法特点	156
10.4 小结	157
第 11 章 泥石流堆积体隧道施工监控量测技术	158
11.1 监测项目及测点布置	158
11.2 监测仪器及监测方法	159
11.3 监测结果及分析	159
11.4 数值模拟结果与现场量测结果对比分析	165
11.5 小结	166
参考文献	168

上 篇

理论基础篇



- 第1章 绪论
- 第2章 压力拱效应研究
- 第3章 基于压力拱理论的围岩压力计算
- 第4章 压力拱理论计算围岩压力方法分析
- 第5章 考虑施工过程的大跨隧道围岩压力计算方法初探
- 第6章 泥石流堆积体隧道衬砌抗震设计

第1章 绪 论

1.1 泥石流的分布及特性

我国泥石流的分布十分广泛,东起黑龙江东部和台湾闽林,南至海南中部,西起新疆西部,北至黑龙江和内蒙古北部,分布着数以万条泥石流沟。大致以大兴安岭—燕山山脉—太行山脉—巫山山脉—雪峰山山脉—一线为界分为两部分:西部的高山、高原、极高山是泥石流最发育、分布最集中、灾害最频繁、危害最严重的地区;东部除台湾中部高中山区、辽宁东南部低山丘陵区 and 吉林东南部中低山区有泥石流密集分布外,其余广大地区仅有零星分布,灾害也相对较轻(图 1-1)。

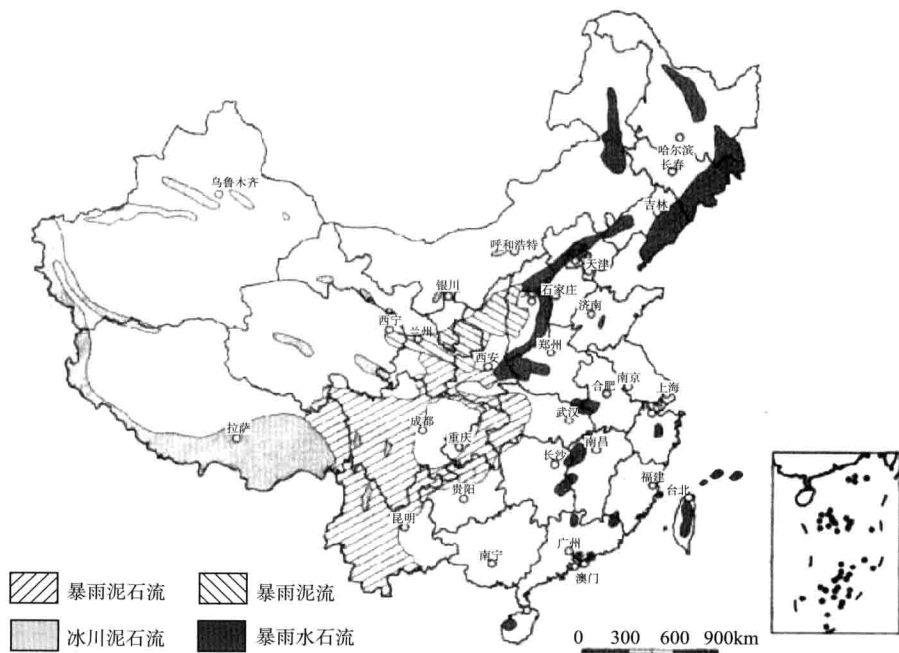


图 1-1 我国泥石流分布(引自中国科学院,水利部山地灾害与环境研究所)

1.1.1 泥石流的分布规律

研究泥石流的分布规律,对于研究泥石流的形成、运动和防治泥石流危害都是必要的。泥石流的分布,主要受泥石流形成的自然因素以及自然和人为因素共同作用的影响,具有明显的规律性。

(1) 沿断裂构造带分布

地质构造控制了区域的地貌构造格局,山脉走向及水系多沿构造线发育。泥石流主要沿山区的地质构造断裂带及强烈褶皱带发育,沿河流及山间盆地的山前分布,因此,泥石流的分布一般具有呈带状的特点。

在断裂带及其附近应力集中,岩体受强烈挤压而破坏,岩层破碎,河流强烈下切,引发规模不等的崩塌滑坡,为泥石流活动提供了丰富的松散固体物质来源。因此,泥石流分布与构造活动有密切关系,表现为泥石流沿断裂构造带密集分布。例如,我国的波密—易贡断裂带、安宁河断裂带、白龙江断裂带、小江断裂带等,均发育了大量的泥石流,成为我国泥石流最为发育的地区,其泥石流数量之多、活动之强、灾害之重,在我国居前列,而且规模大小不一。位于波密—易贡断裂带的迫隆藏布流域公路两侧分布有灾害性泥石流 104 处,其中规模特大的有米堆沟冰湖溃决泥石流、古乡沟冰川泥石流、加马其美沟暴雨泥石流等。

(2) 在地震震中区密集分布

现代地壳活动最明显的反映是地震。在强地震的作用下,岩体的强度和完整性降低,土体孔隙水压力增加,土体的稳定性遭到破坏,崩塌、滑坡发育为泥石流的形成提供了丰富的固体物质来源,而且还能直接激发泥石流,故在多山的地震带大多数是泥石流活动带。我国是多地震的国家之一,泥石流主要集中在烈度为七以上的地震区,1973 年四川炉霍地震(7.9 级),1976 年四川平武—松潘地震(7.2 级)破坏山体,产生了大量的崩塌、滑坡,从而促进了众多泥石流的暴发,灾害成群分布(图 1-2)。

(3) 在软弱岩石和软硬相间岩石区成片集中分布

岩性的软、硬程度决定了岩石的易风化程度和分布区松散碎屑物的多寡,与泥石流分布的关系十分密切。一般说来,软弱岩石抗风化能力差,风化速度快,能为泥石流形成提供更多的松散碎屑物质;坚硬岩石抗风化能力强,风化速度慢,为泥石流形成提供的松散碎屑物质少。因此,在坚硬岩石分布区泥石流分布密度小,在软弱岩石和软硬相间岩石分布区泥石流沟密度大,成片状集中分布。

(4) 沿深切切割的高山峡谷区成带状分布

山区人口主要集中在峡谷区活动,人类活动对自然的影响也主要在峡谷区内体现出来。大量的人类活动,对泥石流活动起着诱发作用。高山峡谷区本身山高坡陡,在地质构造、寒冻风化、地震等的作用下,山体破碎,为滑坡泥石流的活动提供良好条件。高山峡谷区由于下垫面作用,常常是局地性暴雨最为活跃的地方。山体破碎、降雨丰富以及强烈的人类活动等综合作用,使得泥石流在峡谷区成群分布。川藏公路横穿著名的横断山高山峡谷区,沿线泥石流非常发育,成为影响交通的主要因素。

(5) 与暴雨和长历时高强度降水分布区域一致

在降雨泥石流区内,降水是激发泥石流的主要因素。与泥石流分布关系密切的降水量,包

括年平均降水量、最大24h降水量和最大1h降水量等。据资料分析,泥石流分布密度随分布区年平均降水量增多、最大24h降水量增大和最大1h降水量增大而增大;泥石流分布密度随分布区降水量大于或等于0.1mm、50mm、100mm、150mm和200mm的天数增多而增大;泥石流分布密度随降水年内变差系数和年际变差系数增大而增大。一般而言,泥石流分布与暴雨和长历时高强度降水的分布区域基本一致。

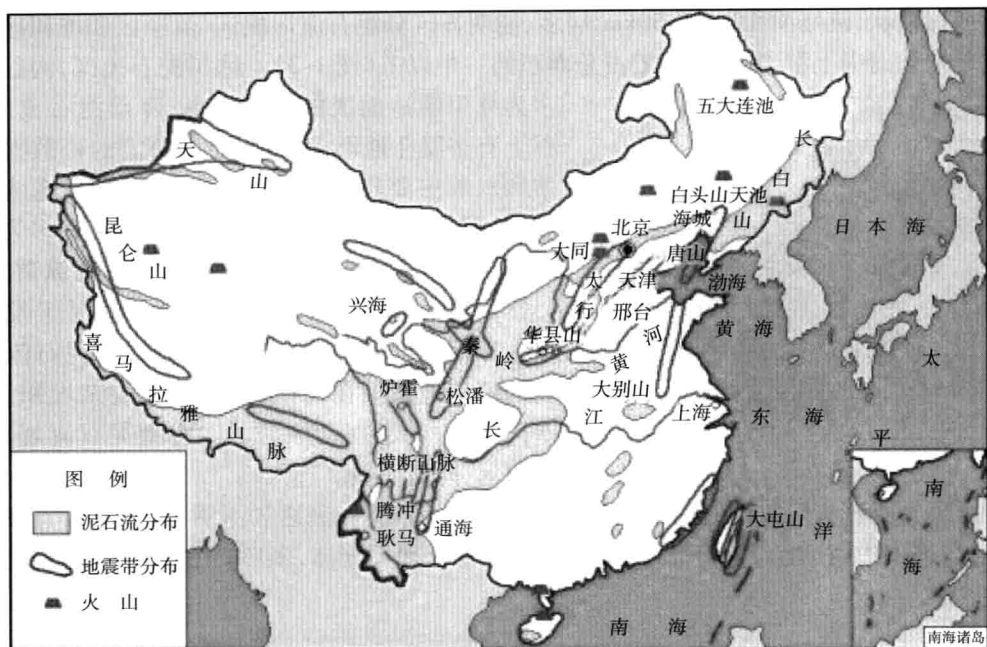


图 1-2 我国泥石流与地震带分布关系

(6) 海拔高度不同泥石流类型不同

我国地势西高东低,海拔跨越非常大,随着海拔变化,高山高原堵断了暖湿气流的运移,相应降水量呈现东南多、西北少的格局;同时地势起伏、气候、水文、土壤、植被等泥石流形成的自然因素都发生了地带性变化。按照海拔的高低,泥石流活动也呈现不同的类型。低海拔(小于2100m)为暴雨型泥石流,海拔升高(2100~3500m)发展为冰雪融水-暴雨型泥石流,海拔继续升高(3500~4000m)多发生冰川型泥石流,海拔再升高(4000m)则会暴发冰湖溃决型泥石流。

1.1.2 泥石流的分类

泥石流是一种形成过程复杂,山泥沙石块、水体和少量空气组成的具有多种流态和运动形式的多相流。不同条件下发生的泥石流,其流体结构、力学性质、活动特征都存在着一定的差异性。只有充分了解泥石流这些属性的差异,选取适当的指标,对泥石流现象进行归纳和分类,才能深刻认识泥石流的发生、发展、运动和成灾规律,对不同类型的泥石流制订切实可行的减灾方案。泥石流分类是对泥石流内在规律和外部特征的概括。

(1) 按规模分类

① 小规模泥石流:一次冲出固体物小于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

②中等规模泥石流:一次冲出固体物 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

③大规模泥石流:一次冲出固体物 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

④特大规模泥石流:一次冲出固体物大于 $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

(2)按泥石流流域沟谷形态分类

①沟谷型泥石流。沟谷型泥石流是发育比较完整的泥石流沟,流域轮廓清晰,多呈瓢形、长条形或树枝状,流域面积以 $5 \sim 50 \text{ km}^2$ 居多,能明显区分泥石流形成区、流通区和堆积区。形成区位于沟谷的中上游,其面积一般占总面积的一半以上(图 1-3)。冰川泥石流区,沟谷上有多为冰川塑造而成的围谷地形;降雨泥石流区,沟谷上有多漏斗地形,形成泥石流所需的松散固体物

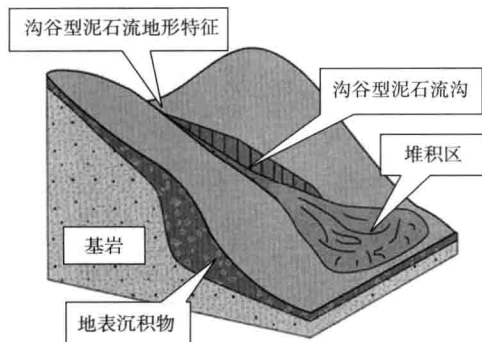


图 1-3 沟谷型泥石流特点

质和水源主要集中于此区。流通区位于流域的中游,是泥石流流向山外的通道,长 $1 \sim 5 \text{ km}$,多为沟谷地形,两岸谷坡陡至 $40^\circ \sim 60^\circ$,沟床纵降比为 $15\% \sim 25\%$,多陡坎,泥石流流经于此易于发生阻塞。堆积区位于流域下游,呈扇形,是泥石流搬运物的停积地段。在这里,大小石块混杂堆积,底面垄岗起伏,沟道摆动频繁。沟谷型泥石流规模大、流程远,阵流明显。

②山坡型泥石流。流域面积小,小于 0.3 km^2 ,呈漏斗状,流通区不明显,形成区直接与堆积区相连,堆积作用迅速。由于汇水面积不大,水源一般不充沛,多形成重度大、规模小的泥石流(图 1-4)。



图 1-4 北川附近山坡型泥石流发生过的痕迹

(3)按固体物质成分分类

①泥流。泥流是指发育在我国黄土高原山区以细粒泥沙为主要组成物质的泥石流。泥流中黏粒含量大于石质山区泥石流,可达 15% (相对密度)以上,含有少量碎石岩屑,黏度大,呈稠泥状,其结构较泥石流更为明显,在流动过程中,流体表面漂浮有大块土体,泥流体向两侧扩散,能力较弱,停积时成扁平的舌状体,无水流外溢,在泥流发育的沟道里或堆积区,可以看到大大小小的泥球或碎屑球(图 1-5)。



图 1-5 泥流现象

②泥石流。泥石流是由浆体和石块共同组成的特殊流体,固体成分从粒径小于 0.005mm 的黏土粉砂到几米至 $10\sim 20\text{m}$ 的大漂砾(图 1-6)。它的级配范围之大是其他类型的夹沙水流所无法比拟的。这类泥石流在我国山区的分布范围比较广泛,对山区的经济建设和国防建设危害十分严重。



图 1-6 舟曲泥石流灾区泥石流

③水石流。水石流是由水与粗沙、石块和巨砾组成的特殊流体,其黏粒含量少于泥石流和泥流。在我国陕西华山一带分布最为典型,它主要发生在风化不严重的灰岩、火山岩、花岗岩等基岩山区。

(4) 按泥石流流体性质分类

①黏性泥石流。黏性泥石流是苏联学者提出的。黏性泥石流又称结构性泥石流,具有“石”多、“泥”少的特点,其固体物质含量高,体积分数在 $40\%\sim 60\%$,最高可达 80% ,这时水就成为泥石流的组成部分而不是搬运的介质。黏性泥石流的稠度大,流体中的固体部分成悬浮状态,具有突发性,持续时间短,破坏性大。

②稀性泥石流。稀性泥石流又称紊流性泥石流,主要特点是“石”少、“泥”多,水是主要的组成部分,黏性土的含量少,固体物质占 10% ~ 40%,水为搬运介质,从而致使稀性泥石流的稠度、黏度小,浮托力弱。流体堆积结构松散、层次不清、渗流性强、流向不稳定,易于漫流改道,有股流、窜流、散流、偏流、绕流、潜流现象。

③过渡性泥石流。过渡性泥石流介于黏性泥石流和稀性泥石流之间。“泥”和“石”比例较为均衡,由大量黏性土和不同粒径的砂粒、石块组成的泥石流的密度,从整体上体现了水和泥沙石块的分配组合特征。

1.1.3 甘肃武都甘家沟泥石流分布特征

甘家沟位于甘肃省武都县城东南 10km 处的白龙江左岸,是一条与云南东川将家沟齐名的严重的泥石流沟,流域内有滑塌体 52 处,面积达 24.3km²,松散固体物质达 13413 万 m³,泥石流形成条件极为优越。

(1) 自然环境与气候条件

武都地处我国大陆二级阶梯向三级阶梯的过渡地带,东临秦岭汉中盆地、南面四川盆地、西接世界屋脊青藏高原、北靠黄土高原,是一个地形交汇,褶皱和断层十分发育地带,它们相互交切、改造和叠加,形成各种不同序次和不同尺度的构造形迹,强烈改造了地质体。本区出露地层众多,且跨越地层分区界线,最古老的是中元古界的碧日群,最新的是第四系。甘家沟位于武都陇南山地中部,属南秦岭高中山侵蚀、风化和构造活动强烈的山地,山高坡陡,沟谷纵横,连绵起伏,坡面支离破碎。该沟流域面积 43.3km²,形态呈葫芦状,南北长 11km,东西宽 6.4km,源头分水岭海拔高度 2105m,沟口与白龙江交汇处 970m,相对高差 1135m。流域主沟长 12km,平均比降 7.3%,山坡平均坡度为 27° ~ 35°,切割深度为 300 ~ 540m。流域内有主要支沟 1 条,长度在 1.5km 以上的支沟 6 条,沟壑密度 2.39km/km²。由于该沟泥石流特别活跃,沟口形成了长 1.5km、面积约 1km²的巨大扇形地(图 1-7),压缩白龙江河床,阻碍水流下泄。

该区新构造运动十分强烈,自第三纪以来,长期处于上升状态,山地平均 100 年升高 1.6 ~ 1.8mm,河道急剧下切,这不仅造成了坡陡沟深的地形,而且加剧了地层的断裂破碎,节理和裂隙的发育,促进了滑坡、坍塌的发生,为泥石流的形成提供了势能条件和充足的物质来源。

由于其特有的地理位置,复杂的地形条件,海拔变化范围大,相对高差大等诸多因素的影响,该区气候的垂直分带和水平分带性均较明显。受地形和大气环流等因素的影响,本区降水量在空间分布上呈现由南向北递减的趋势。降水量由武都东南部的 900mm 向西北降低到武都一两河口段的 500mm;由两河口向北,降雨量一般为 500 ~ 600mm,仅在宕昌以西部分地区大于 700mm。由 1956 ~ 1980 年 25 年的降水资料可知,研究区降水量年内分布在各地都极为不均匀,主要集中在 6 ~ 9 月,占全年降水量的 60% ~ 70%。该区降水偏少,但暴雨较多,日降水 25 ~ 49mm 的大雨发生在 6 ~ 9 月,历年平均 2.1 次。日降水 50 ~ 90mm 的暴雨主要发生在 7、8 两月间,历年平均 0.3 次。这种高强度的降雨量为泥石流的形成提供了足量的水源和足够的动力条件。

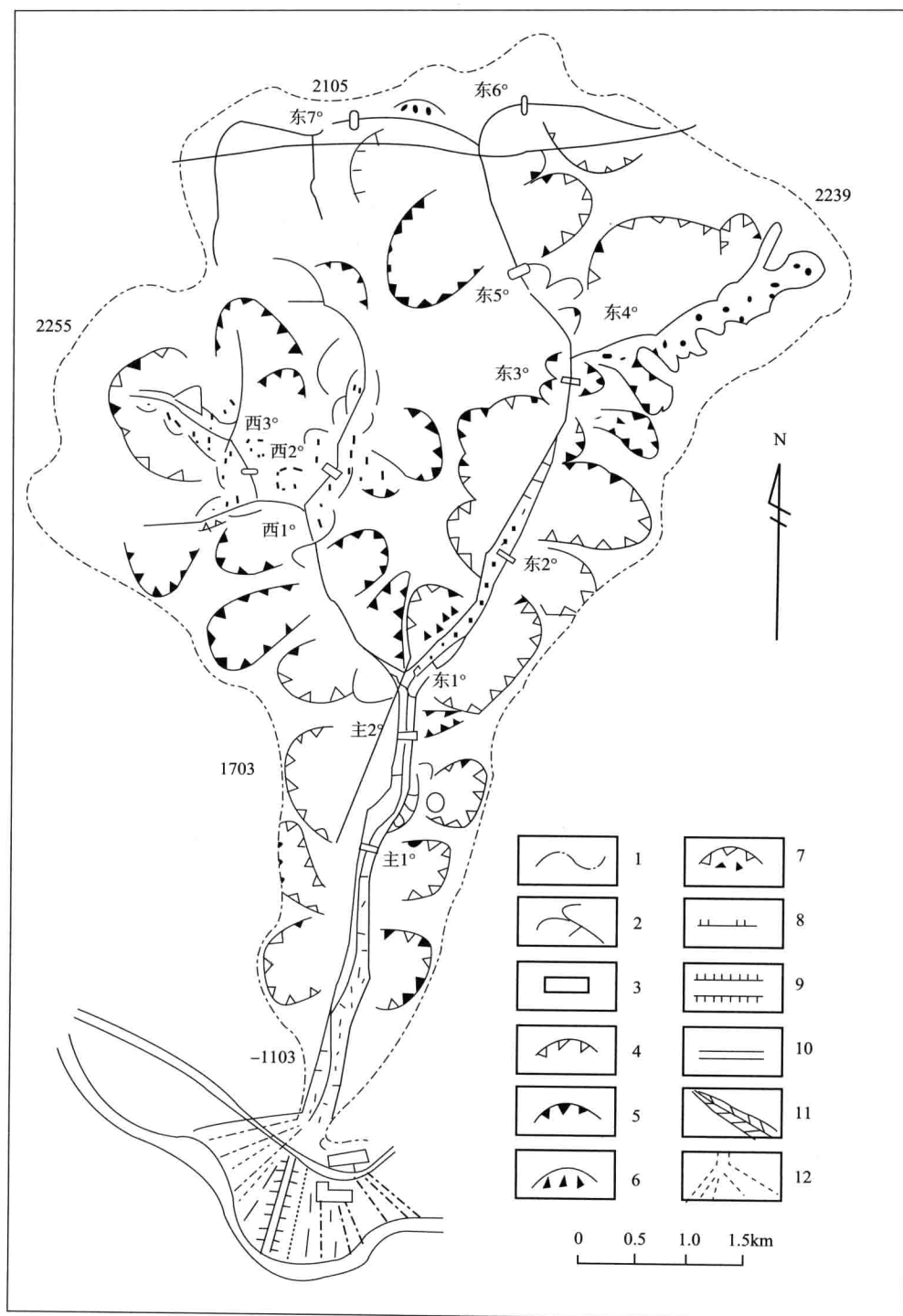


图 1-7 甘家沟泥石流分布情况

1-流域界线;2-流水线;3-拦挡坝;4-活动滑坡;5-老滑坡;6-崩塌体;7-滑塌体;8-断裂带;9-导流堤;10-公路;11-泥石流堆积;12-扇形地