

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.019

北京房山区霞云岭乡四合村安子沟泥石流 成因研究与防治工程设计

周 亮

ZHOU Liang

北京市地质灾害防治研究所, 北京 100120

Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing 100120, China

摘要: 2023 年 7 月 29 日 20 时至 8 月 2 日 7 时, 受第 5 号强台风“杜苏芮”残余环流及副热带高压影响, 北京遭遇有仪器测量记录 140 年以来最强降雨天气, 北京市房山区霞云岭乡四合村安子沟泥石流受强降雨影响严重, 大量碎石冲出后堆积于沟道内, 造成部分排水沟损毁, 村道路基掏空, 农田冲毁, 威胁当地村民的生命财产安全。本文通过对安子沟泥石流现场情况进行详细调查, 采用槽探、物探、岩土测试等勘查手段, 确定了该泥石流的基本特征, 计算了泥石流动力学参数, 结合遥感影像对其形成机制、动力学特征进行了综合分析, 最后对安子沟泥石流进行了综合治理。结果表明: 该沟泥石流在短时强降雨情况下, 大量雨水入渗坡面形成地表径流并汇于沟道内; 由于土壤的含水量增大, 土中孔隙水压力增加, 沟道内堆积物的粘聚力和内摩擦角减小, 导致坡面表层土体失稳发生崩塌、滑坡, 大量松散固体物质涌入沟道; 水流沿沟道侵蚀、侧蚀沟道岸坡又形成了大量松散固体物质。该泥石流松散堆积物动储量为 78294 m^3 , 物源类型主要分为崩滑型、沟道冲刷型、坡面侵蚀型和弃渣堆积型, 其中占比较大的为崩滑型物源、沟道冲刷型物源; 通过计算确定了泥石流动力学的各项参数, 最后采用“沟道清理+拆除破损结构+拦挡坝+排导槽”拦、排相结合的综合治理方案。

关键词: “23·7”强降雨; 安子沟泥石流; 成因分析; 基本特征; 动力学参数; 防治工程设计; 北京房山区

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0229-11

Zhou L. 2025. Formation Mechanisms and Mitigation Engineering Design of the Anzigou Debris Flow in Sihe Village, Xiayunling Township, Fangshan District, Beijing. *South China Geology*, 41(1): 229–239.

Abstract: From 20:00 on July 29 to 7:00 on August 2, 2023, influenced by the residual circulation of Typhoon Doksuri (No. 5) and the subtropical high-pressure system, Beijing experienced its most intense rainfall in 140 years of instrumental records. The Anzigou debris flow in Xiayunling Township, Fangshan District, Beijing, was severely impacted by the heavy rainfall. Massive amounts of debris rushed out and accumulated in the gully, causing partial destruction of drainage ditches, hollowing out of village road foundations, farmland erosion, and posing threats to local residents' lives and property. Through detailed field investigations of the Anzigou debris flow, employing trench exploration, geophysical exploration, and geotechnical testing, this study identified the fundamental characteristics of the debris flow. Dynamic

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-01-06

基金项目: 北京市突发地质灾害监测预警系统工程运行(11000023T000002124048)、北京市突发地质灾害应急调查技术服务(11000022T000000439462)、北京山区道路典型崩塌“五度”专项研究(11000023T000002119382)

作者简介: 周亮(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治与监测预警技术研究, E-mail: zlpages@163.com

parameters were calculated, and remote sensing imagery was integrated to comprehensively analyze its formation mechanisms and dynamic characteristics. Ultimately, comprehensive mitigation measures were implemented for the Anzigou debris flow. Results indicate that due to short-duration intense rainfall, significant rainwater infiltration formed surface runoff converging in the gully. Increased soil moisture content elevated pore water pressure and reduced cohesion and internal friction angle of gully deposits, triggering slope surface instability manifesting itself as collapses and landslides that delivered substantial loose material into the channel. Subsequent channel scouring and bank erosion generated additional loose deposits. The dynamic reserves of loose material totaled $78\,294\text{ m}^3$, with material sources categorized as collapse-slide type (predominant), channel erosion type, slope erosion type, and waste accumulation type. Through parameter calculations of debris flow dynamics, an integrated mitigation strategy as “channel clearance-damaged structure removal-check dams-diversion channels” was adopted, effectively addressing both interception and drainage requirements.

Key words: “23·7” extreme rainfall event (July 2023); Anzigou debris flow; formation mechanism analysis; basic characteristics; dynamic parameters; mitigation engineering design; Fangshan District, Beijing

北京是地质灾害频发的城市之一,特别是崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等与自然地质作用有关的突发性地质灾害尤为突出,其中泥石流是北京地区最严重、破坏力最强的地质灾害,具有复杂性、突发性、防控难等特点。历史上曾发生过 20 多起泥石流灾害,造成严重人员伤亡和重大财产损失。泥石流一般发育于地形切割带、岩性软弱带、岩体破碎带、降雨集中带以及人类工程活动强烈的地区(祝恩珍等, 2019; 向炳霖等, 2024)。2023 年 7 月 29 日 20 时至 8 月 2 日 7 时,受第 5 号强台风“杜苏芮”残余环流及副热带高压影响,地处海河流域的京津冀地区遭遇历史罕见特大暴雨,发生流域性严重洪涝灾害,北京降水量为有仪器设备测量记录以来 140 年的最高值,受灾严重。结合北京市气象台与北京市突发地质灾害监测预警系统数据,房山区平均降水量达 597.7 mm (南赟等, 2024)。2023 年 7 月 29 日 18 时,北京市发布地质灾害气象风险“橙色”预警,由于降雨量持续增加,于 7 月 31 日 16 时升级为“红色”预警(李晓玮等, 2024)。由于“23·7”强降雨造成安子沟沟道内堆积了大量松散固体物质,堆积厚度较大,部分排水沟损毁、道路路基被掏蚀,若再遇强降雨天气,势必给四合村村民带来重大人员伤亡和财产损失,因此亟需开展对安子沟泥石流灾害特征及成因机理研究,为下一步开展治理工作奠定基础(马俊学等, 2024)。

本文以北京市房山区霞云岭乡四合村安子沟流域为研究区,对其受灾过程展开详细调查和灾害特征分析,确定了安子沟泥石流的动力学各项参数,并提出了地质灾害综合治理方案,为小流域灾害防治及提升灾害应对能力提供技术支撑和参考依据。

1 区域地质背景

四合村安子沟位于北京市房山区霞云岭乡政府西南侧,行政隶属于霞云岭乡四合村,沟口地理坐标:东经 $115^{\circ}43'08''$,北纬 $39^{\circ}42'53''$,沟道中下游位置有水泥路与国道 G108 相接。

房山区地处太行山与华北平原的过渡地带,属太行山脉,地形复杂多样,地势为西北高东南低,呈层状地貌,西北部和中部各有一列呈东北至西南走向的褶皱山脉,山体连绵、山峰高峻,是北京西山的核心部分(冉淑红, 2013)。该地区受地形地貌、地质构造、人类工程活动、降雨的影响,泥石流等地质灾害频发(孙永彬等, 2021)。

安子沟所在区域地貌类型属侵蚀构造地貌,新构造运动以来强烈上升,经外力长期强烈的侵蚀切割作用形成中低山。沟域内地层主要为蓟县系雾迷山组(Jxw)白云岩及青白口系下马岭组(Qbx)页岩及粉砂岩,以沟道为中心向沟道两侧大致呈对称分布。沟底堆积大量松散固体物质,表层植被覆盖较差,这为泥石流的形成提供了丰富的物源。

该沟道内人类工程活动较强烈,主要表现为主沟、支沟沟道内道路修建、切坡建房、筑坝垦植等,增大了流体阻塞能力。如遇短时暴雨或连续强降雨,陡峻的地形、狭窄的沟谷有利于地表水及松散固体物源的汇集,增加了发生泥石流灾害的概率。

2 安子沟泥石流成因分析

2.1 地形条件

安子沟地势整体南高北低,相对高差约 740 m,

沟道上游纵坡降大,中下游渐缓,沟谷断面呈“V”型,沟域面积约 8.33 km²,主沟全长 5.14 km,平均纵坡降值 141.63%。沟道两侧坡面坡度一般 25°~35°,植被以灌木、乔木为主,植被总体覆盖率约 90%。安子沟汇水总面积约 8.33 km²,该沟三面环山,近似瓢状或漏斗状,且沟道地形起伏、两侧坡体坡度变化、沟谷间相对高差均较大,此种地形有利于短时间内水流汇集,为泥石流启动提供了所需的水动力条件。根据现场调查,该泥石流沟谷自南向北分为形成区、流通区和堆积区(图 1)。

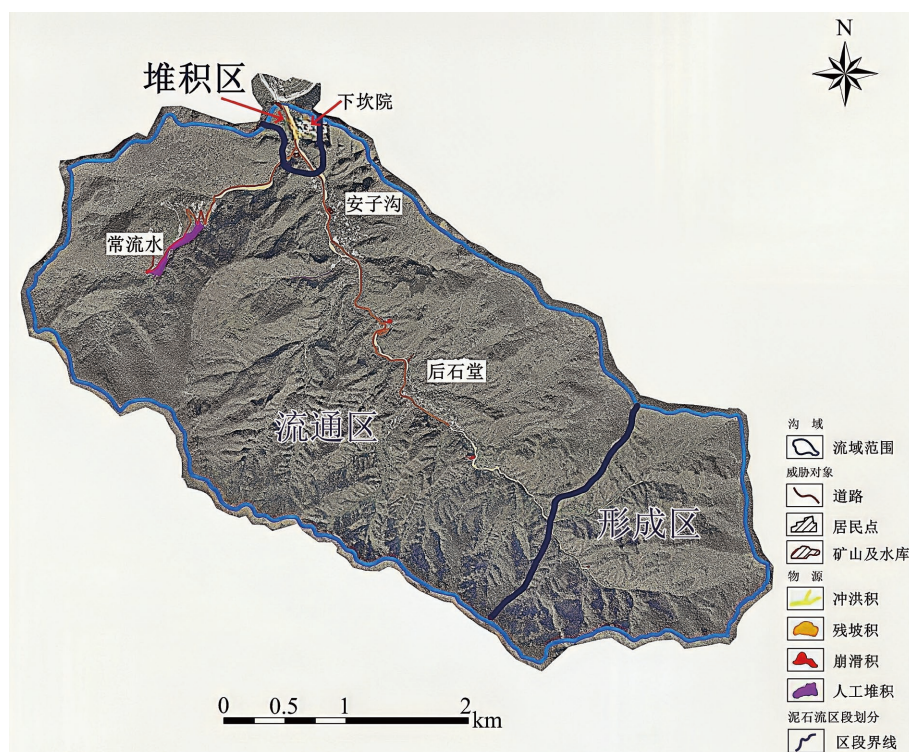


图 1 安子沟泥石流遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing imagery map of the Anzigou debris flow

形成区主要位于流域主沟上游,长度约 1.88 km,该处山坡较为陡峻,沟道纵坡降大,海拔在 650 m 以上。沟谷两侧坡度一般为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,沟道物源所在边坡稍陡,局部呈近似垂直状(图 2a)。物源厚度一般为 0.5 ~ 2 m,最大厚度近 6 m。形成区为泥石流的形成、发展提供强大的水动力条件及丰富的松散固体物质。冲淤特征因不同沟段的纵坡降、汇水面积等差异而表现有所不同,总体上形成区段冲淤特征以冲为主。

流通区主要位于流域主沟中游,长度约

2.20 km, 该段沟道弯曲, 拐点较多, 堵塞程度中等。沟床宽窄不一, 人类工程活动较强烈, 沟道断面呈“V”型, 从上向下逐渐变宽(图 2b), 为泥石流主沟的流通区, 呈峡谷状, 平面上与形成区呈瓶颈状, 沟道地表可见其冲刷淤积特征, 总体上以冲刷为主。

堆积区位于沟道下游段, 海拔 425 ~ 450 m, 沟道宽阔平缓, 宽 25 ~ 55 m, 长约 1.06 km。沟床呈宽缓的“U”形, 纵坡降为 12‰, 沟底宽 10 ~ 40 m (图 2c), 人类工程活动非常强烈。沟道的地形条件决定了该段冲淤特征以淤积为主(图 2d)。在



图 2 安子沟泥石流沟道地形地貌图

Fig. 2 Topographic and geomorphic map of the Anzigou debris flow gully

暴雨洪水影响下, 沟道内冲刷作用将加剧。

2.2 物源条件

根据现场调查及分析, 安子沟泥石流固体颗粒粒径变化范围较大, 巨石、漂石(块石)、卵石(碎石)、砾石、粗砂、细砂、黏性土等胶体颗粒在沟道内均有分布(王珊珊和罗守敬, 2015)。粗颗粒(粒径大于 20 mm)含量高, 占 25%~ 40%, 细颗粒(粒径小于 0.05 mm)含量低, 占 6%~ 15%。通过沟道内的探槽开挖及修路削坡揭露的地层可以看出, 堆积物基本无分选性, 杂乱堆积, 漂(块石)、卵(碎)石约占 70%, 土石比约 3 : 7。下游堆积的碎(块)石粒径一般为 0.2~ 0.6 m, 最大巨石尺寸约为 1.5 m×0.9 m×0.6 m, 因此该泥石流为稀性泥石流(李金海, 2007)。

安子沟泥石流物源主要分布在主沟沟道及两侧岸坡(赵忠海, 2009; 申健等, 2017)。根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》(T/CAGHP006-2018)(中国地质灾害防治工程行业协会, 2018a)的相关规定, 该泥石流物源类型主要为崩滑型、沟道冲刷型、坡面侵蚀型和弃渣堆积型(张佳佳等, 2018; 赵松江等, 2021), 其中占比较大的为崩滑型

物源、沟道冲刷型物源。根据野外调查及物探解译确定物源范围和厚度, 并依据上述规范计算得出物源总储量为 260980 m³, 动储量按总储量的 30% 计算, 因此该沟物源动储量为78294 m³。

2.3 水源条件

安子沟泥石流启动所需的水源主要来自大气降水。因房山地区春季冰雪融水水量较小、沟域内地下水埋深较深均达不到引发泥石流所需的水动力条件, 沟域内又无地表水体, 因此短时强降雨导致地表径流量突增是导致泥石流灾害发生的主要原因(冯驰, 2019; 王文等, 2022)。由于暴雨是安子沟泥石流的主要诱发因素(王毅等, 2018), 所以该泥石流属暴雨沟谷型泥石流(罗守敬, 2023)。

根据“23·7”强降雨期间北京市突发地质灾害监测预警系统中房山区霞云岭乡四合村后台和东南沟监测点位采集的降雨数据分析的结果计算, 四合村平均降水量约 710 mm, 超同时段全区平均降水量的 20% (图 3)。依据《北京市水文手册第一分册暴雨图集》(北京市水文总站和北京市水利规划设计研究院, 1999)计算得出安子沟所在区域 100 年一遇暴雨小时雨强为 106 mm/h。通过

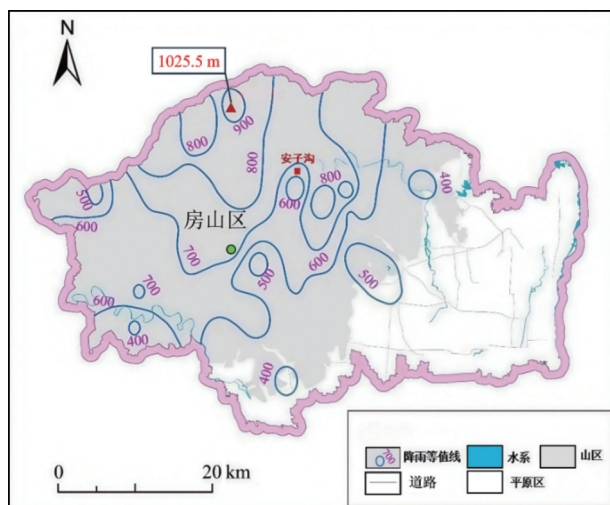


图 3 北京市房山区“23·7”降水等值线图

Fig. 3 Isohyetal map of the "23·7" extreme precipitation event (July 2023) in Fangshan District, Beijing

图中降雨值单位为 mm.

对北京市突发地质灾害监测预警系统监测数据的统计分析,“23·7”强降雨期间房山区最大小时雨强为 118 mm/h。

3 安子沟泥石流基本特征

3.1 泥石流灾害史及灾情分析

根据现场调查和实地走访,该沟于 2012 年 7 月 21 日和 2016 年 7 月 20 日爆发过两次泥石流,造成的经济损失分别为 239 万元和 277 万元,但无人员伤亡,灾情等级均为中型(王海芝, 2009; 申健等, 2018; 王海芝等, 2022)。“23·7”强降雨导致发生水毁灾害,造成大量松散固体物质堆积于沟道内,部分排水沟及路基损毁,威胁当地村民的生命财产安全。

该泥石流沟现状威胁对象主要为四合村村民 50 户 100 人、村路 5 km、360 亩农田,潜在经济损失 5000 万。根据调查结果,结合泥石流沟易发程度评价指标综合分析(黄玉华, 2014; 孙长明等, 2020),该泥石流易发程度为中易发,且处于发育期。

3.2 泥石流基本分类

安子沟泥石流固体物质主要为碎石、块石,分选性差,因此按物质成分划分属于水石流~泥石流类型(何媛等, 2013);按泥石流的水源类型及流

域特征划分,属于暴雨沟谷型泥石流(钟敦伦等, 2004; 李晓玮, 2020);按发生频率划分,属于中频泥石流;按规模划分,属于大型泥石流(陈家华, 1994; 韦京莲等, 1994; 吴正华, 2001)。

3.3 泥石流的成因机制

安子沟泥石流属于暴雨沟谷型泥石流,降雨是泥石流发生的主要诱发和动力因素。“23·7”强降雨使雨水入渗,土壤的含水率激增,导致土体处于基本饱和或饱和状态,土中孔隙水压力增加,沟道内的松散堆积物源力学指标(如粘聚力与内摩擦角)减小,坡面表层土体失稳后发生崩塌、滑坡,沟道两岸的松散固体物质涌入沟道,为泥石流的发生提供了物源条件;在降雨持续加强的情况下,雨水在沟域内沿沟岸和沟床大量汇集形成地表径流,随着地表径流持续增大,不断冲刷掏蚀沟道内堆积物,使其被揭底启动与雨水混掺形成泥石混合物,为泥石流的发生提供了水源条件。由于安子沟沟域是三面环山、一面出口的瓢状或漏斗状地形,因此在沟道内强大水流作用下,卷动沟道内大粒径松散堆积物,启动松散固体物质参与运动,不断增大的地表径流,导致侵蚀力继续增强,大量泥石混合物沿着陡峻、狭窄的沟道向下游快速移动,从而暴发泥石流。

由于主沟的水流量比支沟大,支沟的泥石流汇入主沟后被稀释,重度降低;但其冲刷力越来越强,并将主沟内的松散堆积物冲向下游。流动性强、破坏性大的碎屑物质冲出沟口后向四周发散流动、动能逐渐减小,泥石混合物中固体物质沉淀堆积,在下游形成扇形堆积区。

4 安子沟泥石流动力学参数与防治工程设计

4.1 泥石流运动特征参数

本次防治工程设计在安子沟泥石流主沟和物源较多的两条支沟内,因“23·7”强降雨导致沟道发生严重堵塞位置,分别选取了典型断面进行计算。按频率为 $P=1\%$ (100 年一遇)的暴雨强度,设计小时雨强为 118 mm/h,山坡面径流系数取 0.5,计算出安子沟泥石流运动特征的参数(表 1)。

表 1 安子沟泥石流运动特征参数表

Table 1 Table of dynamic parameters for the Anzigou debris flow

名称	计算断面	断面流速 (m/s)	峰值流量 (m³/s)	一次冲出固体 物质总量(×10⁴ m³)	整体冲击力 P(kN)	大块石 冲击F(kN)	最大冲起 高度(m)	爬高 (m)	弯道超高 Δh(m)
主沟	6—6′	1.93	186.75	2.75	8.27	14.42	0.186	0.28	0.58
Z1支沟	7—7′	2.03	106.26	1.57	9.15	15.16	0.206	0.33	0.50
Z2支沟	10—10′	2.22	25.75	0.38	10.94	16.58	0.246	0.39	070

4.2 岩土特征参数

安子沟内地基土主要为冲洪积与泥石流堆积形成的碎石土, 粒径大小悬殊, 分选性差, 级配差, 孔隙大, 渗透性强, 内摩擦角较大, 呈稍密~中密, 是天然地基的良好持力层。根据探槽开挖难易程度、类比相似地区岩土工程参数(齐干和张长敏, 2011), 安子沟泥石流岩土体物理力学参数见表 2。

表 2 安子沟泥石流岩土体物理力学参数表

Table 2 Table of physical and mechanical parameters of geotechnical materials for the Anzigou debris flow

地基岩土体名称	承载力特征 f_{ak} (kPa)	基底摩擦系数
碎石土	250	0.4
白云岩(强风化)	500	0.65

4.3 抗震及冻土设计参数

根据相关规范规定, 安子沟抗震设防烈度为Ⅶ度, 设计基本地震加速度值为 0.1 g, 特征周期为 0.45 s; 冻土为季节性冻土, 最大冻土深度为 1.0 m。

4.4 地形地貌整治与破损结构拆除

根据以往调查成果(马传浩和陈剑, 2019), 沟内主要为冲洪积和人工堆积形成的碎石土。“23·7”强降雨冲刷出的大量物源堆积于沟床, 造成沟道淤积堵塞。防治工程在沟道堵塞处布设拦挡坝及排导槽, 需对现有淤积在沟道内的松散堆积物进行清理, 减少物源, 疏通沟道, 降低泥石流发生的可能。此外, 需对“23·7”强降雨期间损毁的排水沟及道路残余部分进行拆除。

4.5 拦挡坝

4.5.1 拦挡坝结构设计

拦挡坝主要功能是通过拦截泥石流中的固体物质, 调节泥石流重度和流量, 回淤后固沟稳坡, 降低流速, 抑制上游沟段纵、横向侵蚀, 调节下泄泥石流流向, 减轻对下游的危害。

根据《泥石流防治工程设计规范(试行)》(TCAGHP 021-2018)(中国地质灾害防治工程行业协会, 2018b)的相关规定, 本次防治工程设计原则以流域为单元进行工程措施与生物措施相结合的综合治理, 工程措施以排导为主、拦挡为辅、拦排结合。拦挡坝坝型为实体重力坝, 坝址设在沟段狭窄颈口处上游侧, 中心纵轴顺流向, 有利于溢流段出流并稳定沟床, 顺横轴中部设溢流段, 两侧为非溢流段。依据《房山区霞云岭乡四合村安子沟泥石流灾害隐患勘查报告》(北京市地质工程勘察院有限责任公司, 2024)的相关成果, 本次在主沟中游布设 3 座拦挡坝, 物源较多的 2 条支沟各布设 1 座拦挡坝(图 4)。

1#、4#拦挡坝迎水面坡率为 1 : 0.6, 背水面坡率为 1 : 0.12; 2#、3#、5#拦挡坝迎水面坡率为 1 : 0.8, 背水面坡率为 1 : 0.2。坝体采用素混凝土结构, 混凝土采用 C30。左右坝肩均嵌入沟岸 1.5 m。坝顶设溢流口, 深 1 m (图 5a), 浇筑厚 0.4 m 的 C30 混凝土。坝基底铺设厚 0.1 m 的 C20 混凝土垫层, 坝身设泄水孔, 水平净间距 2 m, 竖向净间距 1.2 m, 纵坡降 5%, 泄水孔为长方形, 孔口外部尺寸 80 cm × 60 cm, 内部净尺寸 60 cm × 40 cm (图 5b)。拦挡坝设计具体尺寸见表 3。

4.5.2 拦挡坝库容计算

拦挡坝主要通过有效库容拦挡泥石流中粒径较大固体物质, 减轻泥石流对下游的破坏; 通过坝体削峰减流作用调节泥石流流体峰值流量, 确保下游排导工程或自然沟道的安全; 通过坝体拦砂作用, 减少沟床揭底冲刷所产生的物源。

对泥石流稳拦能力进行计算, 需先利用回淤坡度确定回淤范围, 再计算库容, 安子沟泥石流库容计算结果见表 4。

由表 4 可知, 拦挡坝回淤库容为 91 250 m³, 满

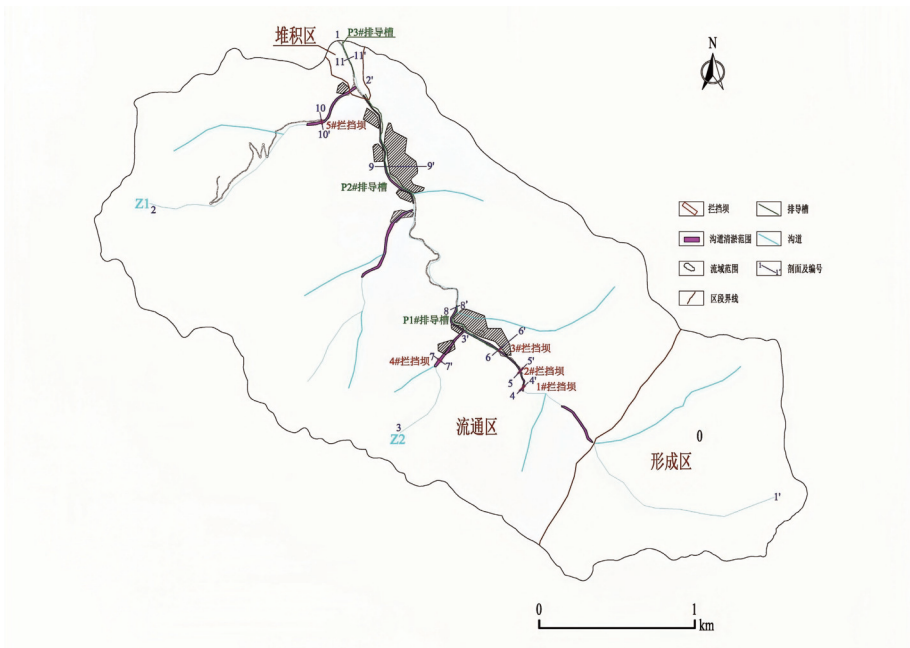


图 4 安子沟泥石流防治工程平面布置图

Fig. 4 Prevention and control layout plan of the Anzigou debris flow

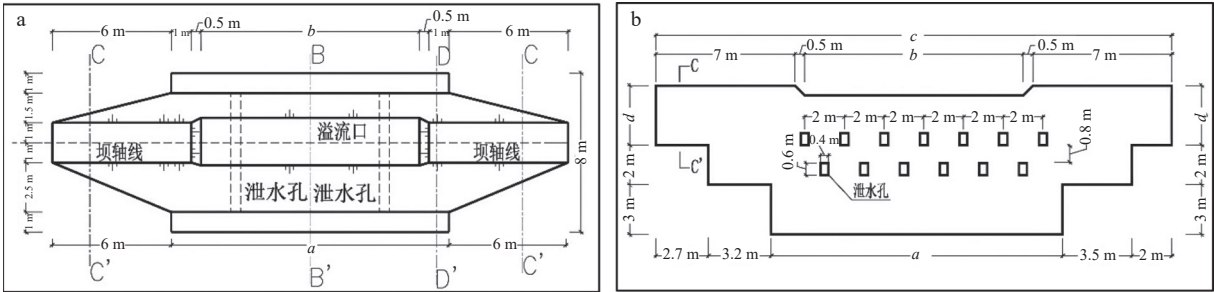


图 5 安子沟泥石流防治工程设计拦挡坝平面图 (a) 和剖面图 (b)

Fig. 5 Check dam layout plan (a) and cross-sectional view (b) for the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

表 3 安子沟泥石流防治工程设计的拦挡坝尺寸参数表

Table 3 Table of check dam dimensional parameters for the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow							
名称	位置	坝高(m)	有效坝高(m)	基础埋深(m)	长度(m)	坝顶宽度(m)	坝底宽度(m)
1#拦挡坝	主沟	10	7	3	50	3	8
2#拦挡坝	主沟	8	5	3	40	3	8
3#拦挡坝	主沟	8	5	3	30	3	8
4#拦挡坝	支沟1	10	7	3	30	3	8
5#拦挡坝	支沟2	8	5	3	25	3	8

足安子沟泥石流流动储量 78 294 m³ 的要求,能有效拦截泥石流物源。

4.5.3 坝体稳定性计算

坝体稳定性计算分别在暴雨工况、暴雨+地震工况下对拦挡坝体进行抗滑移稳定验算、抗倾覆稳定验算及地基承载力验算等,满足规范要

求。本次防治工程设计按 100 年一遇的降雨条件下,拦挡坝工况按满库过流、半库过流、空库过流三种工况(图 6),并考虑地震因素的影响。

(1)坝体自重的计算用下列公式:

$$W_b = V_b \times \gamma_b$$

式中 W_b 为坝体自重(kN); V_b 为坝体单宽体积

表 4 安子沟泥石流防治工程设计的拦挡坝稳拦物源能力表

Table 4 Table of check dam sediment retention capacity for the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

工程名称	沟谷纵比降(‰)	回淤纵比降(‰)	回淤平面面积(m ²)	回淤坝库区平均深度(m)	坝的回淤库容(m ³)
1#拦挡坝	202.8	101.4	11 000	3.5	38 500
2#拦挡坝	87	43.5	1 800	2.5	4 500
3#拦挡坝	61.2	30.6	5 600	2.5	14 000
4#拦挡坝	210	105	5 500	3.5	19 250
5#拦挡坝	230	115	6 000	2.5	15 000
合计					91 250

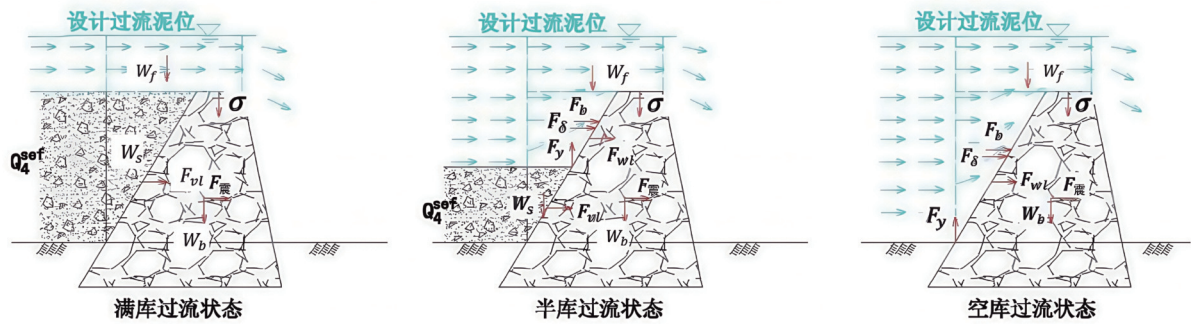


图 6 安子沟泥石流防治工程设计的拦挡坝荷载组合示意图

Fig. 6 Schematic diagram of load combinations for the check dam in the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

示意图坝体材料为浆砌石, $Q4^{sef}$ 表示第四系泥石流堆积物。满库过流时, 作用荷载有: 坝体自重 W_b 、泥石流土体重 W_s 、溢流体重 W_f 、泥石流水平压力 F_{vl} 、过坝泥石流的动水压力 σ , 以及与地震力 $F_{震}$ 的组合。半库过流时, 作用荷载有: 坝体自重 W_b 、泥石流土体重 W_s 、溢流体重 W_f 、泥石流水平压力 F_{vl} 、水平水压力 F_{wl} 、过坝泥石流的动水压力 σ 、泥石流整体冲击力 F_δ 、大块石冲击力 F_b 、扬压力 F_y (考虑了折减), 以及与地震力 $F_{震}$ 的组合。空库过流时, 作用荷载有: 坝体自重 W_b 、溢流体重 W_f 、水平水压力 F_{wl} 、过坝泥石流的动水压力 σ 、泥石流整体冲击力 F_δ 、大块石冲击力 F_b 、扬压力 F_y (未折减), 以及与地震力 $F_{震}$ 的组合。

(m^3); γ_b 为坝体容重 (kN/m^3), 按浆砌石取 $\gamma_b = 24 kN/m^3$ 。

各坝体自重计算参数及结果详见表 5。

表 5 安子沟泥石流防治工程设计的泥石流拦挡坝坝体自重计算表

Table 5 Self-weight calculation table for the check dam structure in the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

名称	坝体容重 (kN/m^3)	坝体单宽 体积(m^3)	坝体自重 (kN)
1#拦挡坝	24.00	62.5	1 500
2#拦挡坝	24.00	51.5	1 236
3#拦挡坝	24.00	51.5	1 236
4#拦挡坝	24.00	62.5	1 500
5#拦挡坝	24.00	51.5	1 236

(2) 泥石流整体冲击力

泥石流整体冲击力按《泥石流灾害防治工程

勘察规范》(T/CAGHP006-2018)附录 I(中国地质灾害防治工程行业协会, 2018a)提供的计算公式

$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha$ 进行计算;

式中 δ 为泥石流冲击力 (kN); λ 为建筑物形状系数; γ_c 为泥石流重度 (kN/m^3); V_c 为泥石流平均流速 (m/s); α 为建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 ($^\circ$)。

主要选取设置拦挡坝及防护工程处的断面进行计算。建筑物形状系数按矩形建筑取 $\lambda = 1.33$ 。安子沟泥石流防治工程设计的各断面泥石流整体冲击力计算参数结果见表 6。

(3) 泥石流中石块的冲击力

泥石流流体中大块石对拦挡坝的冲击力按下式计算:

$$F = \gamma V \sin \alpha \sqrt{\frac{w}{C_1 + C_2}}$$

式中 F 表示泥石流流体中大块石的冲击力(kN); γ 表示动能折减系数,一般取 0.3; V 表示大块石运动速度(m/s),取泥石流流速; w 表示大块石质量(t); C_1 、 C_2 表示大块石、构筑物的弹性变形系数 $C_1+C_2=0.005$; α 表示建筑物受力面与大块石冲击方向的夹角,一般取 90°。各断面泥石流流体中大块石冲击力计算参数结果见表 7。

(4)坝体稳定性验算

①抗滑移和抗倾覆稳定性验算

通过不同工况下的荷载组合计算出不同工况下各坝体的抗滑移、抗倾覆稳定性系数见表 8。根据《泥石流防治工程设计规范(试行)》(TCAGHP 021-2018)(中国地质灾害防治工程行业协会, 2018b)的相关规定:安全等级为 I 级时,

在基本荷载组合下坝体抗滑移稳定性系数应达到 1.25,在偶然荷载组合下坝体抗滑移安全系数应达到 1.08;在基本荷载组合下坝体抗倾覆安全系数应达到 1.60,在偶然荷载组合下坝体抗倾覆稳定性系数应达到 1.15。

由表 8 可知,在不同工况及荷载组合下,各拦挡坝的抗滑移和抗倾覆稳定性系数均满足设计要求。

②地基稳定性验算

通过不同工况,计算出安子沟泥石流坝体地基应力见表 9,由于地基承载力分别为 250 kPa 及 500 kPa (表 2),满足地基承载力设计要求。

4.6 排导槽

根据泥石流的发育特点及“23·7”水毁现状,需在沟道中下游重新修建排导槽,整理沟槽断面,

表 6 安子沟泥石流防治工程设计的拦挡坝整体冲击力计算表

Table 6 Overall impact force calculation table for the check dam in the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

计算部位	建筑物 形状系数 γ	泥石流重度 $\gamma_c(\text{kN/m}^3)$	泥石流平均 流速(m/s)	受力面与泥石流 冲压力方向的夹角($^\circ$)	泥石流整体 冲击力(kN)
1#拦挡坝	1.33	16.69	1.93	90	8.27
2#拦挡坝	1.33	16.69	1.93	90	8.27
3#拦挡坝	1.33	16.69	1.93	90	8.27
4#拦挡坝	1.33	16.69	2.03	90	9.15
5#拦挡坝	1.33	16.69	2.22	90	10.94

表 7 安子沟泥石流大块石冲击力计算表

Table 7 Boulder impact force calculation table for the Anzigou debris flow

计算部位	动能 折减系数 r	泥石流平均 流速(m/s)	受力面与泥石流 冲压力方向的夹角($^\circ$)	大块石 质量(t)	巨石、构筑物的 弹性变形系数 C_1+C_2	泥石流大块石 冲击 $F(\text{kN})$
1#拦挡坝	0.3	1.93	90	3.1	0.005	14.42
2#拦挡坝	0.3	1.93	90	3.1	0.005	14.42
3#拦挡坝	0.3	1.93	90	3.1	0.005	14.42
4#拦挡坝	0.3	2.03	90	3.1	0.005	15.16
5#拦挡坝	0.3	2.22	90	3.1	0.005	16.58

表 8 安子沟泥石流坝体抗滑移和抗倾覆稳定性计算表

Table 8 Anti-sliding and anti-overturning stability calculation table for the dam structure of the Anzigou debris flow

名称	抗滑移稳定性系数						抗倾覆稳定性系数					
	满库过流		半库过流		空库过流		满库过流		半库过流		空库过流	
	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 V	工况 VI	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 V	工况 VI
1#拦挡坝	6.88	2.23	5.46	1.86	3.49	1.21	24.62	11.08	8.87	5.94	2.49	2.18
2#拦挡坝	6.78	2.240	5.83	1.90	3.66	1.23	25.95	11.70	9.40	6.27	2.47	2.17
3#拦挡坝	7.18	2.28	5.14	1.82	3.30	1.23	28.93	12.67	9.09	6.24	2.45	2.17
4#拦挡坝	11.71	2.60	4.17	1.74	3.08	1.25	47.01	16.26	7.86	5.86	2.51	2.25
5#拦挡坝	11.74	2.63	4.53	1.80	3.27	1.36	52.09	17.80	8.31	6.23	2.44	2.21

减小弯道曲率,减小沟床糙率,进一步提高沟道排洪能力,减少泥石流对沟道的破坏。

表 9 安子沟泥石流坝体地基应力计算表

Table 9 Foundation stress calculation table for the check dam of the Anzigou debris flow

工程名称	基底宽度(m)	最小地基应力(kN)	最大地基应力(kN)
1#拦挡坝	8	10.3	184.5
2#拦挡坝	8	10.3	184.5
3#拦挡坝	8	7.4	155.6
4#拦挡坝	8	9.1	168.2
5#拦挡坝	8	8.2	159.1

排导槽为素混凝土结构,采用 C30 混凝土浇筑。排导槽自上而下分三段,第一段长 500 m,第二段长 600 m,第三段长 190 m,双边布置。墙体采用 C30 混凝土浇筑,截面尺寸为地上部分顶宽 1.0 m,迎水面坡率 1 : 0.46,背水面 1 : 0.05,高 2.0 m;地下部分截面为矩形,底宽 2.0 m,基础埋深 2.0 m(如遇基岩下挖 0.5 m,凿毛处理后浇筑),基底铺设厚 10 cm 的 C20 混凝土垫层(图 7),排导槽底部及侧壁后部部分地段土体回填时应夯实。每隔 3.0 m 设置一个泄水孔,上下两排,泄水孔直径 110 mm,内置 PVC 管,孔后设置反滤包。排导槽侧壁及底部每隔 10 m 左右应设置沉降缝,

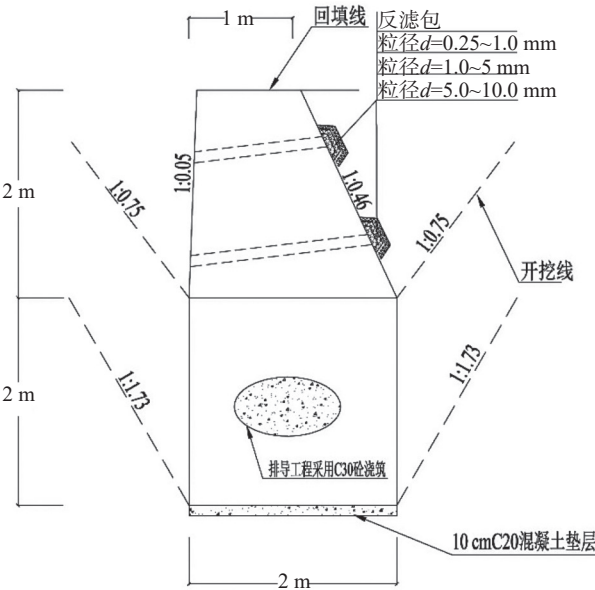


图 7 安子沟泥石流防治工程设计的排导槽大样图

Fig. 7 Detailed design drawing of the diversion channel for the mitigation engineering design of the Anzigou debris flow

缝宽 2 cm, 沥青木板充填。

5 结论

(1)北京市房山区安子沟泥石流物源类型主要为崩滑型、沟道冲刷型、坡面侵蚀型和弃渣堆积型,其中占比较大的为崩滑型和沟道冲刷型物源。物源总储量为 260980 m³,其中动储量为 78294 m³。该泥石流属于暴雨沟谷型泥石流。

(2)安子沟泥石流目前处于发育期,采用雨洪法得出 100 年一遇降雨条件下,主沟洪峰流量值为 186.75 m³·s⁻¹;对应的一次固体冲出总量为 2.75×10⁴ m³,整体的冲击力为 8.27 kN,最大冲起高度为 0.186 m;两条支沟洪峰流量值分别为 106.26 m³·s⁻¹、25.75 m³·s⁻¹;对应的一次固体冲出总量分别为 1.57×10⁴ m³、0.38×10⁴ m³,整体的冲击力分别为 9.15 kN、10.94 kN,最大冲起高度分别为 0.206 m、0.246 m。

(3)安子沟泥石流防治工程的关键在于降低泥石流水动力条件,避免在短时强降雨条件下启动沟道内的松散堆积物源。遵循“预防为主、防治结合”的理念,本文采用“沟道清理+拆除破损结构+拦挡坝+排导槽”的综合治理方案,构建了“上游固源拦挡、中游疏导分洪、下游排泄防护”的立体防护体系。通过工程结构与生物措施相结合、拦挡与排导相协同的系统治理,不仅显著提升了沟道的行洪能力,更提高了泥石流的防治标准,切实保障了下游四合村村民的生命财产安全,实现了灾害防治与生态修复的双重效益。

参考文献:

北京市地质工程勘察院有限责任公司. 2024. 房山区霞云岭乡四合村安子沟泥石流灾害隐患勘查报告 [R].

北京市水文总站,北京市水利规划设计研究院. 1999. 北京市水文手册第一分册暴雨图集 [Z]. 北京:北京市水利局.

陈家华. 1994. 北京北山地区泥石流灾害特点及其防治现状研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 5(S1): 36-44.

冯 驰. 2019. 北京碓河寺沟泥石流成因及综合防治对策 [J]. 矿产勘查, 10(11): 2728-2733.

- 何媛,袁爱萍,胡影,夏照华.2013.北京泥石流沟道现状调查及特征分析[J].中国水利,(21):49-51.
- 黄玉华.2014.陕北延安地区2013年“7.3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J].灾害学,29(2):54-59.
- 李金海.2007.北京山洪泥石流[M].北京:中国林业出版社.
- 李晓玮.2020.不同工况条件对均质土体稳定性的影响[J].城市地质,15(4):371-379.
- 李晓玮,郭英,郑晓钰.2024.北京市门头沟区“23·7”强降雨引发地质灾害特征及防治建议[J].城市地质,19(3):291-298.
- 罗守敬.2023.北京市房山区突发地质灾害发生规律、成因分析及防治对策[J].城市地质,18(4):1-7.
- 马传浩,陈剑.2019.地质雷达技术在泥石流灾害调查中的应用—以北京房山南安主沟泥石流为例[J].地质与勘探,55(4):1066-1072.
- 马俊学,高会然,许冲.2024.北京市昌平区韩台村“23·7”暴雨山洪泥石流灾害特征分析[J].水利水电技术(中英文),55(7):1-18.
- 南赟,翟淑花,李岩,曹颖,罗守敬,王云涛,郭学飞.2024.北京地区“23·7”特大暴雨型地质灾害特征及预警成效分析[J].中国地质灾害与防治学报,35(2):66-73.
- 齐干,张长敏.2011.达摩沟泥石流形成的物质条件分析及防治对策[J].水文地质工程地质,38(5):102-109.
- 冉淑红.2013.北京市门头沟区地质灾害隐患特征[J].城市地质,8(3):30-34.
- 申健,李瑜瑶,李巧刚.2018.北京房山地区泥石流特征分析[J].城市地质,13(1):59-63.
- 申健,刘晓晓,李巧刚,郭英.2017.北京房山典型泥石流物源特征及防治建议[J].城市地质,12(3):46-49.
- 孙长明,马润勇,尚合欣,谢文波,李焱,刘义,王彪,王思源.2020.基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质,47(3):173-181.
- 孙永彬,王洗,高丽辉,王瑞军,王凤,董双发,汪冰,张恩,李存金.2021.北京延庆地区南湾道豁子沟泥石流发育特征[J].现代地质,35(3):753-762.
- 王海芝.2009.北京景区泥石流灾害灾情评估模型的建立与应用[J].城市地质,4(4):31-33.
- 王海芝,曾庆利,许冰,胡福根,于森.2022.北京“7·21”特大暴雨诱发的地质灾害类型及其特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,33(2):125-132.
- 王珊珊,罗守敬.2015.门头沟山区泥石流发育特征与岩石类型的相关性分析[J].城市地质,10(S1):156-160.
- 王文,马超,张志,张岩,路璐.2022.北京云蒙山片区“7·16”群发性暴雨泥石流特征研究[J].山地学报,40(4):626-636.
- 王毅,唐川,何楚,龚凌枫.2018.基于降雨频率的泥石流危险性评价研究[J].长江科学院院报,35(1):67-72.
- 韦京莲,董桂芝,赵波.1994.北京山区近代泥石流活动规律及爆发周期分析[J].中国地质灾害与防治学报,5(4):48-53.
- 吴正华.2001.北京泥石流灾害及其降水触发条件[J].水土保持研究,8(1):67-72.
- 向炳霖,铁永波,李果,张宪政.2024.川西红层地区泥石流特征研究—以德昌县群英村王家坡沟为例[J].华南地质,40(1):143-151.
- 张佳佳,刘建康,高波,陈龙,李元灵,邹任州,黄亮.2018.藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J].地质力学学报,24(1):106-115.
- 赵松江,赵峥,袁广.2021.九寨沟震区泥石流物源特征研究[J].四川地质学报,41(1):93-97.
- 赵忠海.2009.北京地区泥石流灾害的发育特征及预报方法探讨[J].资源调查与环境,30(1):47-54.
- 钟敦伦,谢洪,王士革,韦方强,靳怀成,刘世建,汤家法,杨进怀.2004.北京山区泥石流[M].北京:商务印书馆.
- 中国地质灾害防治工程行业协会.2018a.泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)T/CAGHP006-2018[S].武汉:中国地质大学出版社.
- 中国地质灾害防治工程行业协会.2018b.泥石流防治工程设计规范(试行)TCAGHP021-2018[S].武汉:中国地质大学出版社.
- 祝恩珍,韩帅,孙萍,王刚.2019.甘肃天水地区渭河南岸大砂沟泥石流发育特征[J].现代地质,33(1):227-234.