

The Development Condition and Prevention Countermeasure of Glacier Debris Flow in the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan Highway

Xueli Wei^{1*}, Bin Li¹, Huaiyi Zhao¹, Wei Li^{1,2}

¹Academy of Transportation Planning Surveying and Design, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Email: *weixl8115@126.com

Received: Mar. 21st, 2017; accepted: Apr. 11th, 2017; published: Apr. 14th, 2017

Abstract

The Aierkuran gully locating on the Sino-Pakistan Highway K1601 was selected as the case study. The formation conditions and startup mode of the glacial debris flow were analyzed, and a reasonable and effective prevention measure was proposed preliminarily. The results show that the material sources of debris flow in the Aierkuran gully belonged to the central supplying type, and are mainly distributed in the old accumulation fan out of the mountain. The total volume of material sources is about $12.7 \times 10^5 \text{ m}^3$, and the dynamic storage is about $36.8 \times 10^4 \text{ m}^3$. The large numbers of glacier melt water poured down along the steep rock slope ($>40^\circ$) in summer. The high potential energy is transformed into strong flow kinetic energy immediately, which flushes the loose materials of the alluvial fan along the steep slope (363-176‰) gully, and further a large-scale debris flow would be triggered. The startup mode can be summed up as scour-start type and blockage-outburst type. Combining with the formation conditions, the gully topography and the destruction form, etc., the control mode of "direct and straight draining + cascade energy lowering + main river transporting" is suggested and the main control measures included the ground sills and the enrockment diversion dike. The results will provide the reference base for preventing the glacial debris flow along the Sino-Pakistan Highway.

Keywords

Sino-Pakistan Highway, Debris Flow, Aierkuran Gully, Development Condition, Prevention Measures

中巴公路艾尔库然沟冰川泥石流发育特征与防治对策

魏学利^{1*}, 李 宾¹, 赵怀义¹, 李 伟^{1,2}

作者简介: 魏学利, 男, 博士后, 主要从事公路地质灾害形成机理及防治方面的研究工作。

*通讯作者。

文章引用: 魏学利, 李宾, 赵怀义, 李伟. 中巴公路艾尔库然沟冰川泥石流发育特征与防治对策[J]. 水资源研究, 2017, 6(2): 103-111. <https://doi.org/10.12677/jwrr.2017.62014>

¹新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆大学, 新疆 乌鲁木齐

Email: *weixl8115@126.com

收稿日期: 2017年3月21日; 录用日期: 2017年4月11日; 发布日期: 2017年4月14日

摘要

以中巴公路K1601处艾尔库然沟为研究对象, 分析艾尔库然沟冰川泥石流的形成条件和起动的模式, 初步提出合理的防治模式和治理对策。研究发现: 艾尔库然沟物源为集中供给型, 主要分布在出山口老堆积扇, 总方量约为 $12.7 \times 10^5 \text{ m}^3$, 其中动储量为 $36.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 夏季大量冰川融水沿陡峭岩质山坡($>40^\circ$)倾泻而下, 高位势能瞬间转化为强大水流动能, 沿大比降沟道(363-176‰)冲刷堆积扇松散物质, 在较短时间形成规模较大泥石流, 其起动的模式可归纳为冲刷起动的型和淤塞溃决型两种。结合泥石流形成条件、沟道地形地貌及泥石流危害形式等, 提出顺直排泄+梯级降能+主河输移的防治模式, 主要工程措施包括铅丝笼浅槛群和堆石导流堤等。研究结果可为中巴公路沿线冰川泥石流的防治提供参考依据。

关键词

中巴公路, 泥石流, 艾尔库然沟, 发育条件, 防治对策

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国西北部帕米尔公格尔山地区处于青藏高原西北构造结, 地质条件复杂, 冰川广泛分布, 冰碛物分布于不同海拔高度, 又加上冰川积雪在暖季受持续高温作用, 急剧消融而突发性水源大量增加, 为冰川泥石流发育创造优越的地形条件和水热条件, 致使区域冰川泥石流活动频发, 对中巴经济走廊带内重大工程建设和运营产生严重威胁。冰川泥石流是发育在高海拔冰缘山区, 以冰雪融水、冰湖溃决为水动力在沟谷或山坡上产生的一种携带大量冰碛或雪崩岩屑等固体物质的特殊洪流[1], 具有暴发突然、规模大、破坏力强和防治困难等特点。中巴公路盖孜村至布伦口段为冰川泥石流最为发育且危害最为严重路段[2], 初步调查, 在 30 km 路段仅公路一侧就有冰川泥石流 27 条, 几乎每年均发生泥石流灾害, 周期性融雪和冰川消融条件, 促使泥石流活动具有一定的周期性, 其频率为每年一次, 甚至可达 3~4 次, 常常对公路造成路基路面掩埋冲毁和堵塞桥梁等危害[3], 而温暖季节正好为中巴之间贸易往来和旅游的旺季, 冰川泥石流发生严重阻碍了中巴经济走廊带的发展。

中巴公路国内段的初探始于上世纪 70 年代[4][5], 近年来, 一些学者对中巴公路泥石流进行了一定的研究, 但多集中于区域泥石流类型的分类、形成因素和危险性评价等, 如刘杰[6]、魏小佳[7]等分析了中巴公路奥布段泥石流发育特征及防治措施, 朱颖彦[8]、廖丽萍[9]、胡进[10]等对中巴公路巴基斯坦段泥石流分布和危险性进行研究, 王景荣[11]在对中巴公路喀什至塔什库尔干路段冰川泥石流危害和分布特征分析基础上, 并重点对艾尔库然沟泥石流形成条件进行分析, 以上研究成果缺少对单沟泥石流系统研究, 难以为公路泥石流工程防护提供参考依据。另外, 当前对冰川泥石流的研究相对较为薄弱[12], 而中巴公路沿线冰川泥石流具有其独特发育背景和起动的模式, 难以直接借鉴其他地区防治措施进行有效治理。为此, 本文选取中巴公路奥布段 k1601 处艾尔库

然沟为研究对象, 基于实地调查和资料搜集, 分析冰川泥石流形成条件和起动的模式, 初步提出冰川泥石流的有效防治对策。

2. 流域概况

中巴公路是世界上海拔最高的山区公路, 位于塔里木盆地西南的西昆仑山腹地, 在大地构造上属西昆仑褶皱系, 也处于喜马拉雅西北构造结, 区域地貌形态在强烈的新构造运动、活跃的地震及其他外力作用下, 以强烈挤压、褶皱和隆起等形式, 形成高耸的褶皱山和断块山等多种地貌类型, 如公格尔山海拔高程为 7649 m。其中奥依塔克—布伦口段是中巴公路国内段的重要组成部分, 该区自然条件恶劣, 地形条件复杂, 新构造运动活跃, 地震频发, 侵蚀切割作用强烈, 现代冰川广泛发育, 再加之冻融循环、寒冷风化严重, 导致沿线泥石流灾害多发, 由于特殊地形地貌条件, 路线多依山傍(盖孜)河而行, 公路难以避让绕行, 对公路的重大工程建设和运营造成严重威胁, 尤以泥石流灾害最为严重。

艾尔库然沟位于中巴公路奥布段 k1601 处, 公格尔山脚下, 昆盖山南麓, 地理位置为 N 38°46'02", E 75°11'44", 呈近北西向展布, 在中巴公路处经泥石流沟桥、红旗桥及三个涵洞流入盖孜河。流域呈簸箕形, 流域面积为 1.88 Km², 沟道长 5.5 km, 平均比降 290‰, 最高点海拔 4917 m, 沟道总体顺直, 局部有小的拐弯, 流域清水形成区和物源供给区分界明显, 形成区为悬冰-冰斗地形, 近乎圈椅状, 具有良好汇水地形, 储藏大量冰川和积雪; 融水沿陡峭岩石沟槽倾斜而下, 坡度 40°~50°左右, 为冰雪融水提供了强大的动能和势能; 堆积区供给区为老泥石流堆积扇, 扇缘宽度为 1.5 km 左右, 扇顶至盖孜河最大距离约为 1.8 km, 扇面比降变化于 5°~15°之间, 堆积扇上乱流改道明显, 出现多个老泥石流沟道, 当前堆积扇主要以左右两条支沟为主, 最大沟道位于堆积扇左侧, 公路泥石流沟桥处断面宽 20 m, 深度约为 18 m, 沟道比降达到 10°; 在右支沟泥石流堆积区中下游已修建排导设施, 排导槽宽度约 166 m, 深度 1.5~2 m, 单侧长度约 147 m, 但由于右侧支沟乱流改道和沟道堵塞明显, 造成公路经常发生掩埋和冲击危害。

艾尔库然沟流域概况, 如图 1 所示。艾尔库然沟地形地貌, 如图 2 所示。

3. 艾尔库然沟泥石流形成条件

(1) 水源条件

泥石流源头多为冰帽冰川, 冰层覆盖高程大于 4000 m, 冰层厚度 20~50 m, 在夏季气温骤升, 大量冰雪快速融化, 为泥石流提供了良好的水力条件。艾尔库然沟平均每年至少发生 1~3 次泥石流, 而且都发生在 7 月和 8 月之间, 时间都在下午 3~4 点左右, 历时不超过 20 分钟, 而且泥石流均发生在晴朗的天气, 主要与气温关系最大。如 1984 年 8 月 18 日泥石流暴发时的气温为 22.6℃ (海拔 2685 m), 该沟泥石流暴发在时间上恰好处在本地区冰川消融的旺季。

流域泥石流灾害主要发生在 7、8 月份, 这两月为本区日照最长的时刻, 太阳辐射和气温对冰雪消融起主导作用, 平均年日照数 2827.6 h, 海拔 3500 m 以上高山带, 由于空气稀薄且少云雨天气, 是日照时数较多的区域, 年日照时数可达 3000~3300 h, 区域年平均气温在海拔 2400~3200 m 的中山带为 0℃~5℃, 据前人观测, 8 月份在海拔 2685 m 处日气温变化为 10~26℃, 推测 4400 m 雪线附近为 5℃~10℃左右(图 3)。另外, 该区域为处于西风带控制, 平均每年大风日数为 200 天, 当气温的消融效应在有风天气时增, 尤其是刮热风时将使冰雪消融极大加强。

(2) 物源特征

从物源供给和分布特征上, 艾尔库然沟物源为堆积区集中供给形式, 物源主要分布在沟口老堆积扇堆积物, 堆积扇厚度变化于 10~30 m, 扇顶距公路距离约为 1.8 km, 松散物源总方量约为 12.7×10^5 万 m³, 其中近期可能参加泥石流活动的动储源约为 36.8×10^4 m³, 主要分布于堆积扇上现有沟道内及沟道两侧岸坡; 物源类型为



Figure 1. Basin characteristics of the Aierkuran gully
图 1. 艾尔库然沟流域概况



Figure 2. Geographic and geomorphic conditions in the Aierkuran gully
图 2. 艾尔库然沟地形地貌

冰碛物和冰水堆积物，结构疏松，粗颗粒多，呈大孔隙架空结构，高动能冰川融水流易沿土体发生渗流并冲刷起动形成泥石流。据现场调查，冰碛土干密度为 2.33 g/cm^3 ，渗透系数为 27.4 mm/min ，天然含水量 $2.1\% \sim 8.68\%$ 。冰碛物的表面为灰白色，呈骨架结构，冰碛石磨圆度很低，多呈棱角至次棱角状，其岩石成分以花岗片麻岩、石英质云母片岩为主。冰碛土体颗粒粒径级配曲线如图 4 所示，不均匀系数 $C_U = 310 > 5$ ，曲率系数 $C_S = 0.99 < 1$ ，说明冰碛土为不良级配土，粗细颗粒分布不均匀，粒径分布范围广，颗粒以砾砂为主，粉粘粒含量较低，其中砾石含量占 52.38% ，砂粒含量占 29.17% ，粉粒、黏土含量分别占 16.52% 和 1.93% 。

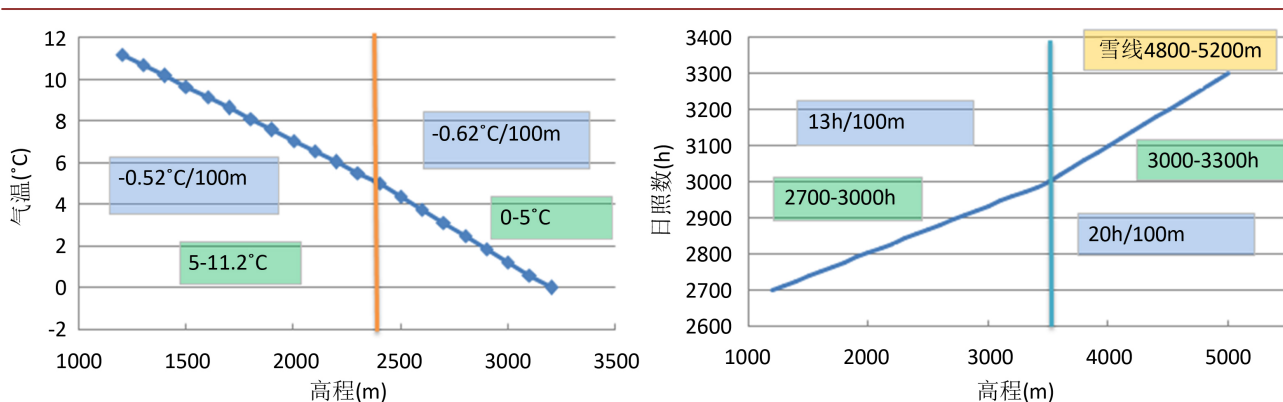


Figure 3. Temperature and sunshine time variation rules with increasing height

图 3. 研究区气温和日照数随高程增加变化规律

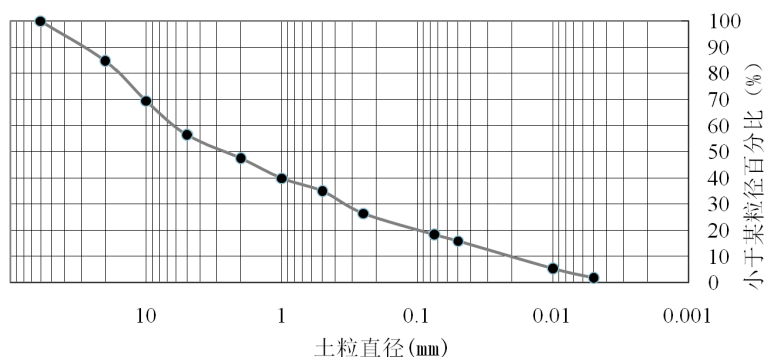


Figure 4. Particle size distribution curve of debris flow materials

图 4. 泥石流堆积物颗粒分布曲线

(3) 能量条件

泥石流的形成和运动与沟床比降密切相关。与以往泥石流的形成、流通和堆积区明显不同，该流域可明显分为清水形成区和物源供给区，泥石流的形成流通和堆积区均发生在物源区。沟道流域面积较大，坡面长度较短，流域形状系数大，形状系数为 0.87，流域外形近方形，水量集中快易于产流。清水形成区为高陡山坡，坡度介于 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，垂直高差约为 1000 m，高势能冰川融水瞬间下泄转化为强大动能，将对物源区堆积物产生较大冲击力；物源区沟道长度为 4.83 km，高差约 500 m，沟道纵坡降由上至下变化于 363~132% (图 5)，阶梯状变化的沟道比降为泥石流提供了强大的动力条件和优越地形条件。

4. 泥石流形成过程与起动模式

艾尔库然沟为典型冰川泥石流，上游大量冰雪在高温季节产生融水，水流沿陡峭山坡倾泻而下，高位水流转化为高速水流冲击堆积扇老堆积体，促使堆积物冲刷起动而形成泥石流；同时泥石流以强大冲刷侵蚀力沿途沟底揭底和岸坡侧蚀，泥石流规模不断扩大；但随着堆积区坡降变缓以及沟道展宽，泥石流将发生前端沟道堵塞，而后续泥石流仍以高速前进，前后泥石流体之间将发生动量传递和物质交换，致使泥石流乱流改道和溃决而产生规模放大效应，对公路产生极大灾害且难以采取有效措施进行防护，从现场沟道发现多级堵塞溃决现象。

泥石流起动模式可分为两种形式：① 冲刷起动型，高势能冰雪融水沿陡坡下泄转化为高速水流，高速紊动水流沿大比降沟道冲刷沟道堆积物，在堆积物体上发生冲切拉槽和揭底侵蚀，致使沟道堆积物起动形成泥石流；② 淤堵溃决型，可分为沟岸坍塌淤堵溃决型和弯道阻塞淤堵溃决型，对于沟岸坍塌淤堵溃决型泥石流，泥石流沿沟道排泄过程中，受沟道微地形变化，局部冲刷淘蚀两岸堆积物坡脚，促使沟岸堆积体坍塌堵塞沟道，在水流汇

集到一定程度时将发生能量瞬间释放，从而诱发溃决型泥石流灾害；对于弯道堵塞溃决型，泥石流沿沟道运动至下游时，由于沟道比降变小且弯道增多，泥石流流速降低且发生局部停淤，而后续泥石流仍高速前进，冲击已停淤泥石流体而发生溃决形成更大规模泥石流(图 6)。

5. 泥石流防治对策

当前中巴公路从泥石流堆积扇的扇缘通过，公路采用过水路面形式，当大规模泥石流发生时常常淤埋路基路面，导致多数车辆、人员被困。由于流域冰川面积覆盖较大，致使夏季融水量大，又加上物源丰富和地形陡峭，高速水流冲刷老泥石流堆积体常形成规模较大泥石流；同时，对于这种大型冰川泥石流堆积扇上也常常暴发高频小规模泥石流的现象，由于其暴发突然性和不确定性而难以进行风险预测评估，且常常发生乱流改道，造成公路建设中难以采取有效合理防治措施，又加上，堆积区物源丰富和动储量量大，难以采取拦截和清淤；故本次根据泥石流形成和运动堆积特点以及公路防护形式，提出顺直排泄 + 梯级降能 + 主河输移的防治模式，即在堆积区两大沟道内开挖顺直排洪沟，将沟道开挖土体堆积排洪沟一侧形成堆石导流堤，并对迎水面面进行混凝土面层防冲处理，同时在沟道内设置梯形浅槛降低泥石流冲刷力和速度，最后将泥石流排泄至公路预设桥梁处而进入盖孜河，通过盖孜河强大水动力将泥石流堆积物输移至下游，避免淤积堵河(图 7(a))。

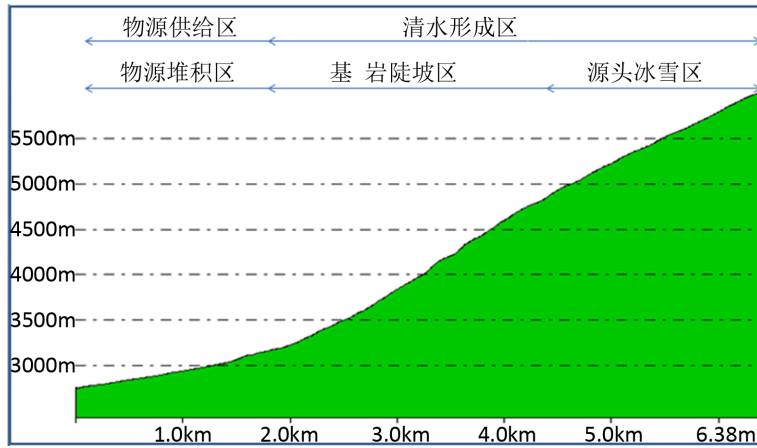


Figure 5. Zoning plan of channel profile in the Aierkuran gully
图 5. 艾尔库然沟沟道纵断面分区图



Figure 6. Initiation types of debris flows in the Aierkuran gully
图 6. 艾尔库然沟泥石流启动类型

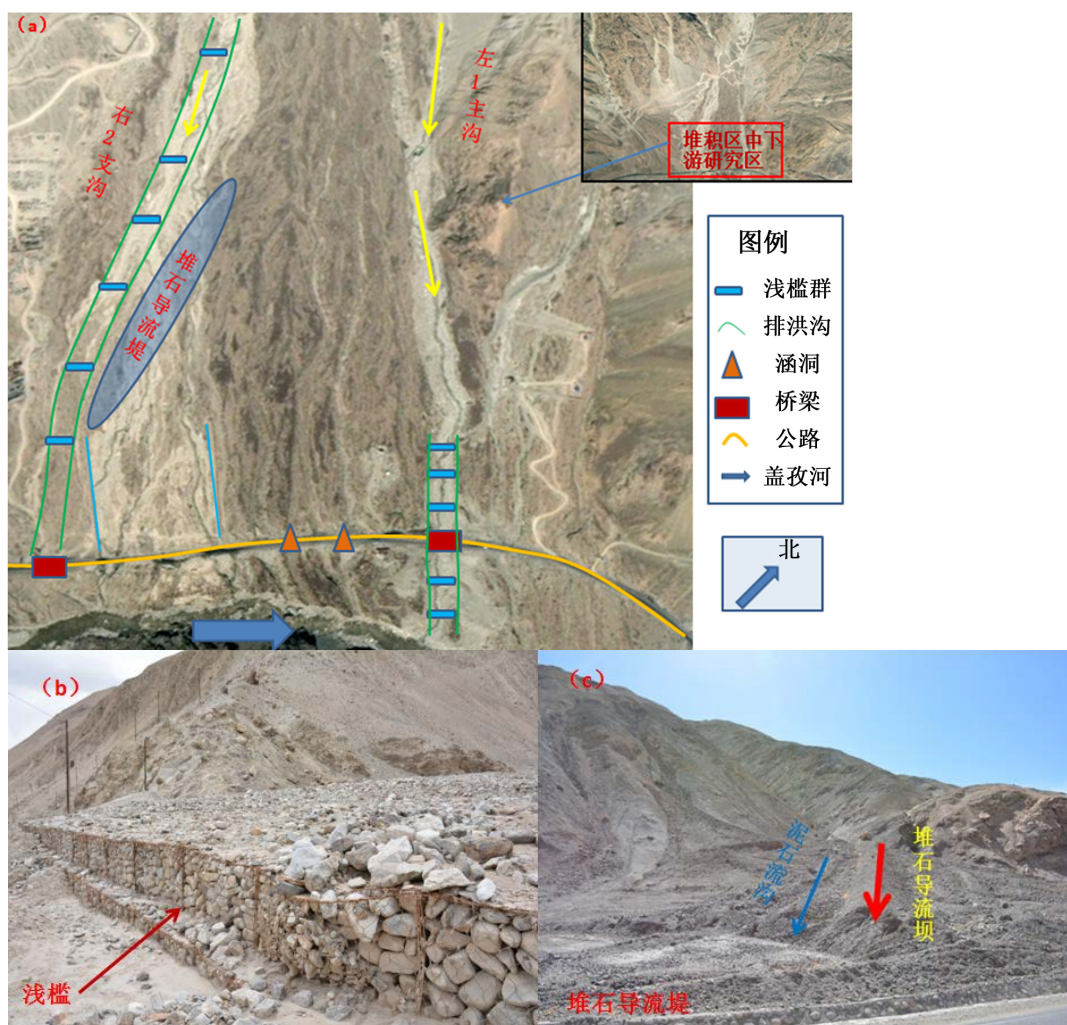


Figure 7. Sketch map of debris flow prevention project in the Aierkuran gully
图 7. 艾尔库然沟泥石流防治工程布置图

左 1#支沟为艾尔库然沟主沟，由于其沟道宽深，下游布设一孔中桥，暂时未对公路造成较大破坏，沟道比降大，局部沟底和岸坡基岩出露，存在多级跌水，故本次拟采取排泄为主治理措施，充分利用天然沟道的排泄条件，对其进行疏导清淤，并设置梯级浅槛群和局部护脚墙，以降低沟道坡降和稳坡固床，并将泥石流通过公路桥梁排入盖孜河。

右 1#支沟为艾尔库然沟最大支沟，近年来泥石流暴发频繁且规模较大，在沟道内产生多级堵塞漫流溃决等现象，造成在堆积扇上乱流改道，故本次拟通过开挖天然沟道、归拢乱流和顺直排泄的综合治理对策，在右 2#泥石流支沟中下游开挖顺直沟道，并设置浅槛群和局部护脚墙，防止乱流改道和沟道侵蚀，同时将开挖土体堆积于中下游左侧岸边，以拦挡防护作用，排洪沟尾端与公路的红旗桥相连，将泥石流排泄进入盖孜河。

由于艾尔库然沟冰川泥石流规模大、冲击力强且危害严重等特点，采取常规的防治模式和治理措施难以达到理想效果。据调查公路沿线已有防治工程，在 K1690 处设置单体铅丝笼坝拦截效果较好，减缓沟道比降且降低水流冲刷动力(图 7(b))，在 K1750 处布设堆石导流堤，将泥石流顺畅排泄至预设位置且运行良好(图 7(c))，本次综合考虑艾尔库然沟泥石流活动特征、沟道地形特点、与盖孜河位置关系以及盖孜河水动力条件等，结合其它地区和其它型泥石流防治经验，提出顺直排泄+梯级降能+主河输移的防治模式，以及梯级谷坊群 + 堆石导流

堤组合工程治理措施, 将极大改善沟道地形条件和降低水流冲刷动力, 抑制水流冲刷冰碛土起动形成泥石流, 而且防治工程均为就地取材, 造价低且工程量小, 具有良好的可行性和适用性。

6. 结论

1) 艾尔库然沟为典型物源集中供给型冰川泥石流, 可分为明显清水形成区和物源供给区, 清水形成区为冰帽悬冰川融水形成流通区, 物源供给区泥石流形成流通区, 物源类型为老泥石流堆积体的冰碛物和冰水堆积物, 总方量约为 $12.7 \times 10^5 \text{ m}^3$, 其中动储量为 $36.8 \times 10^4 \text{ m}^3$;

2) 上陡下缓的流域地形坡度($10^\circ \sim 50^\circ$)和大坡度沟道纵比降(363%~132%)为泥石流形成创造了优越地形条件和强大的动能, 源区厚度较大冰雪覆盖(20~50m)和日照足且多风的天气为冰川泥石流暴发提供了良好水热条件;

3) 艾尔库然沟泥石流的起动模式可分为冲刷起动型和淤塞溃决型两种形式; 结合泥石流发育条件和沟道地形等因素, 提出顺直排泄 + 梯级降能 + 主河输移的防治模式, 主要包括浅槛群和堆石导流堤等防治措施, 可确保中巴公路的正常运营和安全畅通。

基金项目

国家自然科学基金青年基金(41602331); 中国沙漠气象科学研究基金(Sqj2015015); 中国博士后基金(2016M602951XB); 新疆交通厅科技项目(2015-2017)。

参考文献 (References)

- [1] 屈永平, 朱静, 卜祥航, 等. 西藏林芝地区冰川降雨型泥石流起动实验初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 3256-3266.
QU Yongping, ZHU Jing, BU Xianghang, et al. Preliminary starting experiment study glacial rainfall debris flow, in Nyingchi, Tibet. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 3256-3266. (in Chinese)
- [2] 张学进. 中巴公路沿线地质灾害分布特征及防治[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2013(2): 45-50.
ZHANG Xuejin. Study on the distribution characteristics and control for geological disasters along International Karakoram Highway. Journal of Chongqing Technol Business University (Natural Science Edition), 2013(2): 45-50. (in Chinese)
- [3] 陆军, 刘杰, 王立波. 中巴喀喇昆仑公路奥依塔格 - 布伦口段泥石流灾害及防治[J]. 防灾科技学院学报, 2015(2): 42-49.
LU Jun, LIU Jie and WANG Libo. Debris flow hazards and prevention along the Aoyitage-Bulunkou section of the International Karakoram Highway. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2015(2): 42-49. (in Chinese)
- [4] 施雅风, 张祥松. 喀喇昆仑山巴托拉冰川的近代进退历史变化[J]. 地理学报, 1978, 33(1): 27-42.
SHI Yafeng, ZHANG Hexiang. Historical variations in the advance and retreat of the barura glacier in the Karakoram mountains. Acta Geographica Sinica, 1978, 33(1): 27-42. (in Chinese)
- [5] 张祥松. 喀喇昆仑公路沿线冰川的近期进退变化[J]. 地理学报, 1980, 35(2): 149-160.
Zhang Xiangsong. Recent variations in the glacial termini along the Karakoram highway. Acta Geographica Sinica, 1980, 35(2): 149-160. (in Chinese)
- [6] 刘杰, 毛爱民, 王立波, 等. 中巴喀喇昆仑公路奥依塔克镇 - 布伦口段泥石流灾害及防治[J]. 公路, 2015(12): 8-14.
LIU Jie, MAO Aimin, WANG Libo, et al. Debris flow disaster and prevention on the Aoyitage-Bulunkou section of Karakoram highway from China to Pakistan. Highway, 2015(12): 8-14. (in Chinese)
- [7] 魏小佳, 裴向军, 蒙明辉. 中巴公路奥依塔克 - 布伦口段高寒山区泥石流特征[J]. 水土保持通报, 2015(3): 354-358.
WEI Xiaojia, PEI Xiangjun and MENG Minghui. Characteristics of debris flow at Aoyitake-Bulunkou section of Sino-Pakistan Highway in Alpine Mountains. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015(3): 354-358. (in Chinese)
- [8] 朱颖彦, 杨志全, 廖丽萍, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川地貌地质灾害[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 81-90.
ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, LIAO Liping, et al. Glacialized geomorphological geohazard along China-Pakistan international Karakoram Highway. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 81-90. (in Chinese)
- [9] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 中巴公路泥石流灾害破坏及防治优化[J]. 地质科技情报, 2013, 32(6): 168-174.
LIAO Liping, ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, et al. Debris flow hazards and prevention optimization along international Karakoram highway. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(6): 168-174. (in Chinese)

- [10] 胡进, 朱颖彦, 杨志全, 廖丽萍. 中巴公路沿线冰川泥石流的形成与危险性评估[J]. 地质科技情报, 2013(6): 181-185.
HU Jin, ZHU Yingyan, YANG Zhiquan and LIAO Liping. Formation and hazard evaluation of glacial debris flow disasters along International Karakoram Highway. Geological Science and Technology Information, 2013(6): 181-185. (in Chinese)
- [11] 王景荣. 中巴公路喀什至塔什库尔干路段冰川泥石流[J]. 冰川冻土, 1987, 9(1): 87-95.
WANG Jingrong. An analysis of the harm and genesis of glacial debris flow along the China-Pakistan highway from Kashi to Tashikuergan. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(1): 87-95. (in Chinese)
- [12] 铁永波, 李宗亮. 冰川泥石流形成机理研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 861-866.
TIE Yongbo, LI Zongliang. Progress in the study of glacial debris flow mechanisms. Advance in Water Science, 2010, 21(6): 861-866. (in Chinese)