

陈华勇, 陈晓清, 赵万玉, 等. Attabad滑坡堵江次生灾害对中巴公路的影响[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 81–85. [CHEN Huayong, CHEN Xiaoqing, ZHAO Wanyu, et al. The effects of attabad landslide secondary geo-hazard on the Karakoram highway [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 81–85. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.015.]

Attabad滑坡堵江次生灾害对中巴公路的影响^{*}

陈华勇^{1,2,3}, 陈晓清^{1,2,3}, 赵万玉¹, 罗志刚⁴

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100000;
4. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100000)

摘要:结合 Attabad 滑坡堰塞坝现场调查、堰塞湖上游来水来沙数据分析结果, 利用人工库区泥沙淤积平衡经验关系, 分析了滑坡堰塞湖库区泥沙回淤长度与泥沙上延距离; 运用溃决峰值流量计算公式, 计算了堰塞湖溃口峰值流量, 研究了堰塞湖溃决洪水流量沿程变化规律。结果表明: Attabad 堰塞湖上游来流中泥沙平均含量约为 1.63 g/L, 各干支中, 干流 Hunza 河携带的固体颗粒物质是 Attabad 堰塞湖淤积的主要物质来源, 占整个淤积量的 77.64%; 在堰塞湖水深 81.3 m 情况下, Attabad 堰塞湖的回水长度约为 18.03 km, 因泥沙淤积而导致回水上延 4.48 km; 利用肖克列奇溃口坝址最大流量经验公式, 评估了 Attabad 堰塞坝 1/4 溃决、1/3 溃决、1/2 溃决情景模式下溃决峰值流量, 分别为 27923 m³/s、12523 m³/s、6936 m³/s。本研究可为堰塞湖库区公路选线设计及下游地区溃决洪水的风险评估提供参考。

关键词: Attabad 大滑坡; 次生灾害; 中巴公路; 泥沙淤积; 溃决洪水

中图分类号: TV14; X43; X15.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)04-0081-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.015

中巴喀喇昆仑公路(Karakoram Highway, 简称 KKH), 位于帕米尔高原腹地, 是世界上海拔最高的山区公路^[1]。它北起中国新疆喀什, 翻越喀喇昆仑山红其拉甫口岸(Kunjerab Pass)进入巴基斯坦, 南到巴基斯坦北部城市塔科特(Thakot), 全长 1 036.0 km。中巴公路穿越世界最高的三大山脉兴都库什、喀喇昆仑和喜马拉雅山脉的交汇处, 该区新构造运动活跃、地震活动频繁、地形地貌多变、气候复杂、侵蚀剧烈, 加之冰川作用强烈^[2-4], 区域内发育着流砂坡^[5]、崩塌滑坡^[6-8]、泥石流^[9]等山地灾害及其次生灾害(滑坡堰塞湖、泥石流堰塞湖)。滑坡堵江形成堰塞坝, 坎前壅水形成堰塞湖, 造成回水淹没, 同时水流携带的大量泥沙淤积于上游河段, 加速河道淤积^[10-14]; 当堰塞坝溃决时, 溃决洪水导致下游河水位迅速抬升, 形成的溃决洪水将对下游地区人民的生命财产构成严重威胁^[15-17]。巴基斯坦北部洪扎河(Hunza River)河谷喀喇昆仑公路对岸的阿塔巴德村(Attabad)边发生滑坡后, 堵河形成堰塞湖, 崩

毁、淹没房屋 54 座, 造成 60 座房屋部分破坏、1 所学校完全被毁、20 人遇难和失踪, 破坏和掩埋 KKH 公路近 16 km 以及连接 Gulmit 和 Shaskat 两座城镇的桥梁 1 座^[1], ^[18]。

受地震、极端降雨、人工开挖等内外因素激发作用下, 国内外滑坡堵江形成堰塞湖的事件很多。杨霞等结合三峡水库蓄水后大部分支流河口段淤积现象, 以香溪河河口段为例, 在分析其河口泥沙淤积特点的基础上, 阐述了三峡水库蓄水、来水来沙条件及河口河势等因素对于其河口泥沙淤积的影响, 探讨了泥沙淤积的发展趋势^[19]。李孟洋等采用 Brune 模型计算梯级水库拦沙率, 综合考虑出入库输沙量与上下游水库的拦沙量, 分析了小湾电站的库区淤积量^[20], 但是专门针对堰塞湖库区回水淹没、泥沙淤积规律以及河道演变规律的研究并不多见。本文将重点分析 Attabad 滑坡堰塞湖的泥沙淤积和溃决洪水对中巴公路安全运营的影响, 以期相关研究成果为类似研究提供技术支撑。

* 收稿日期: 2019-03-13 修回日期: 2019-06-20

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0100100); 国家自然科学基金项目(41661144028; 41771045); 中科院山地所‘一三五’方向性项目(SDS-135-1701); 中国科学院创新促进会(2017425)

第一作者简介: 陈华勇(1982-), 男, 四川广汉人, 研究员, 博士, 主要从事堰塞湖溃决机理与防治对策方面研究。

E-mail: hychen@imde.ac.cn

1 Attabād 堰塞坝的基本特征

1.1 Attabād 滑坡堰塞坝

2010年1月4日11:30, 巴基斯坦北部洪扎河(Hunza River)河谷喀喇昆仑公路对岸的阿塔巴德村(Attabād)边发生一次规模巨大的滑坡($N36^{\circ}18'26.6''$, $E74^{\circ}48'54.9''$)。滑坡堆积体堵塞了洪扎河谷形成堰塞坝, Attabād 堰塞坝平面形态为长条形, 顺河长约1100.0 m, 坝顶宽约600.0 m, 坝高118.0~200.0 m, 体积约2500万 m^3 。堰塞坝上游坝坡水上部分长约200.0 m, 坡较陡, 坡度约 $25\sim30^{\circ}$ 。下游坝坡长约500.0 m, 坡度约 $12\sim18^{\circ}$, 滑坡体剖面及滑坡全貌如图1、图2所示。

1.2 堤体颗粒级配

根据堰塞坝粒径组成现场测量分析, 堤体主要由以粉砂、粉质粘土含块碎石组成, 块碎石岩性主要为混合质花岗岩、花岗闪长岩。块石含量较高, 约占35%~55%, 块石最大粒径可超过10.0 m(图3)。在滑坡的中前部表层普遍分布深灰至灰黑色粉

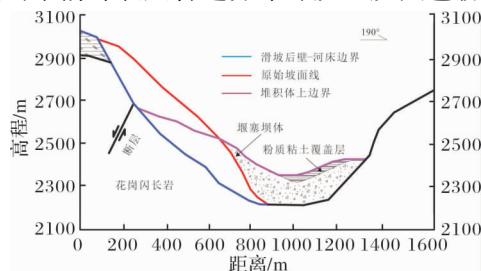


图1 Attabād 滑坡体剖面图



图2 Attabād 滑坡堰塞坝全貌

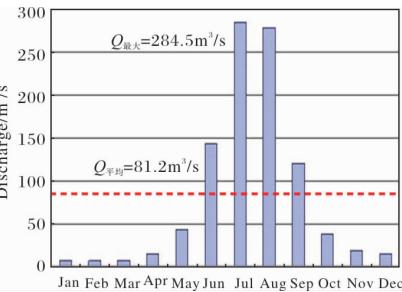


图3 堆积体中的大石块

质粘土, 大部分已与块碎石混杂, 仅中部分布集中且块石含量少, 可见厚度超过15.0 m(图4)。

2 Attabād 堰塞湖对中巴公路的影响

2.1 上游来流与库容分析

根据洪扎河水文站观测资料统计分析(水文站距堰塞湖下游88.6 km), 洪扎河上游年来水量分配很不均匀, 主要集中在6~9月份的雨季, 占全年的80%以上。3~4月份进入枯季, 上游来水量仅占全年来水量的20%左右, 枯水期流量在20.0~30.0 m^3/s , 到6月份, 上游来水量为140.0 m^3/s , 7月份的来水量最大, 达到280.0 m^3/s (典型年内流量变化), 9月份以后, 随着气温降低和降雨减少, 流量逐渐减小(图5, 红色虚线所示)。2018年5月, 笔者调查 Attabād 堰塞湖时, 其水位高程仍在2379.3 m左右(堰塞湖水深81.3 m)。根据已有的水位-库容关系曲线可知(图6), Attabād 堰塞湖仍然存在约1.92亿 m^3 的库容, 如果发生溃决将对下游地区民众的生命财产安全构成严重威胁。



图4 表层粉质粘土



图5 堰塞湖上游来流年内分配

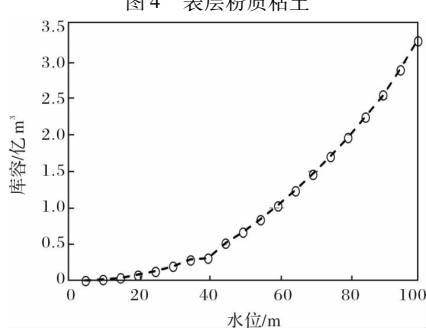


图6 堰塞湖水位库容关系曲线



图7 水样采集点分布

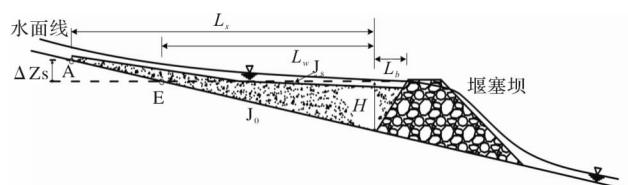


图8 Attabād 堰塞湖泥沙淤积示意图

表 1 各采样点水体含沙率测量结果

取样点	平均流量/(m ³ /s)	含沙量/g	采样体积/L	含沙率/(g/L)
主河右岸	81.2	0.71	0.311	2.28
Batura 冰川	40.1	0.46	0.461	1.00
Passu 冰川	15.0	0.11	0.268	0.41
Ghulkin 冰川	10.0	0.19	0.262	0.73

表 2 各水样颗粒级配分布

取样点	颗粒成分/%						
	砂粒/mm 1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005
Batura 冰川	0.00	0.00	3.81	4.82	34.12	21.60	35.66
主河右岸	0.00	1.45	8.60	5.40	38.88	20.47	25.20
Passu 冰川	0.00	0.72	2.72	3.98	46.22	24.76	21.60
Ghulkin 冰川	0.00	1.11	11.89	8.57	48.81	16.56	13.06

2.2 Attabad 堰塞湖上游来沙特点

通过对洪扎河上游主河及三大冰川融水悬移质采样发现: Hunza 主河含沙量平均为 2.28 g/L, Batura 冰川下游入汇平均流量 40.1 m³/s^[26], 含沙量平均为 1.00 g/L; Passu 冰川和 Ghulkin 冰川入汇流量较小, 经现场测量, 平均流量分别约为 15 m³/s、10 m³/s, 平均含沙量为 0.41 g/L 和 0.73 g/L, 如表 1 所示。由此可知: Attabad 堰塞湖上游来流中泥沙平均含量约为 1.63 g/L。就各水样颗粒级配变化规律而言, 在三大冰川融水补给和主河水样中, 其 0.01~0.05 mm 的粉砂含量均最大, 几乎占库区淤积物质总量的一半(平均为 42.01%), 如表 2 所示。

2.3 库区泥沙淤积对堰塞坝上游段公路的影响

山区河流一般坡降较大, 水流流速大、携沙能力强。当堰塞坝上游水位抬高, 库区水力坡降变小, 上游来流的过水断面面积增加, 流速降低, 导致水流的携沙能力减弱, 使得水流中携带的泥沙发生沉降、淤积, 并逐渐向坝前发展。随着淤积高度的不断增加, 库尾泥沙“翘尾巴”的情形不可避免, 导致库尾水位抬升, 淹没范围增加(图 8), 进而扩大了堰塞湖对中巴公路的影响范围。为定量评估堰塞湖库区淤积对中巴公路的影响, 本文借用人工大坝库区淤积的分析计算方法, 结合 Attabad 堰塞湖上游地形及来水来沙特征, 估算库尾泥沙“翘尾巴”现象对中巴公路的影响距离。

设最高水位平交于原河床的交点 E, 至坝址的长度为 $L_w + L_b$, 由于迎水坡面为滑坡松散堆积体的自然休止角(约为 42°), 堰塞坝上游最大水深 H 与 L_b 为同一量级, 且远小于 L_w , 则:

$$J_0 = \frac{H}{L_w} \approx \frac{H}{L_b + L_w} \quad (1)$$

式中: $L_b + L_w$ 为堰塞湖回水长度。对于 Attabad 堰塞湖而言, 库区水位达到 65.0 m 时, 上游回水达到 11.0 km, 可以得到河道的原始沟道比降约为 0.006。

假定淤积末端点 A 到坝址的水平长度 L_s , 根据三角形相似原理, 可以得到:

$$\frac{L_s}{L_w} = 1 + \frac{\Delta Z_s}{H} \quad (2)$$

针对库区淤积达到终极状态时因为翘尾巴对

淹没范围增加的影响, 并认为翘尾巴高度为:

$$\Delta Z_s = H \left[a \left(\frac{q_s}{\gamma' q J_0} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中: H 为堰塞坝坝前水深(m), γ' 为浑水容重(kg/m³), q_s 为多年平均单宽输沙率(kg/(s·m)), q 为多年平均单宽流量(m³/(s·m))。根据已有的人工大坝库区泥沙淤积实测数据分析, 得到 $a = 0.93$, $b = 0.064$, 公式适用于坝前水深 $H = 12.0 \sim 89.0$ m, 含沙率 $S = 0.16 \sim 286.0$ kg/m³。本文中坝前水深 81.3 m, 含沙率 1.63 kg/m³。

Attabad 堰塞湖库区水深及来流泥沙含量满足式(3)的条件, 由式(2)~式(3)可以得到

$$L_s = L_w + \left[0.93 \left(\frac{q_s}{\gamma' q J_0} \right)^{0.064} - 1 \right] \cdot L_w \quad (4)$$

通过现场调查与水样分析发现, 主河及各支流含有大量的悬移质, 而堰塞坝下游下泄水流基本则比较清澈, 这个现象也说明堰塞坝的拦蓄作用对悬移质的停淤起了很大的作用。通过 2010~2012 年的 3 年时间大量的泥沙在 Attabad 堰塞湖库尾沉积来看, 泥沙淤积严重威胁中巴公路的运营安全。而库区淤积泥沙主要源于丰水期洪水作用, 而从图 6 可以看出, Hunza 河的丰水期主要集中在 6~9 月。因此, 可以根据 6~9 月的平均流量计算主河的单宽流量: 6~9 月的平均流量约为 207.5 m³/s, 平均河道宽度 80.0 m, 单宽流量为 2.59 m³/s, 以堰塞坝库区现有水深 81.3 m, 平均单宽输沙率 4.22 kg/(s·m) 为例, 由式(4)可以得到 $L_s = 18.03$ km, 即因为泥沙淤积而导致回水上延 4.48 km。

2.4 溃决洪水对堰塞坝下游段公路的影响

2010 年 Attabad 堰塞坝形成后, 通过人工处置湖区水位下降了约 30.0 m, 堰塞坝基本处置稳定泄流状态。但是在一些特殊的内外因素作用下, Attabad 堰塞坝仍然可能发生溃决: ①突发震级较大的地震(如 2005 年克什米尔 7.0 级地震)导致坝体稳定性的破坏; ②极端降雨、冰湖溃决洪水、冰滑坡涌浪作用下导致溢流水头突然增加, 改变了溢流通道的临界水力平衡条件, 使得溢流水量大幅增加, 溢流通道底部的粗化层再次起动、搬运, 溢流口不断扩宽, 从而导致坝体失稳溃决; ③缺乏滑坡堆积体内部钻探资料, 无法确定坝体

内部物质基本组成，倘若滑坡堆积体底部仍然存在类似堆积体表面粉质粘土的软弱夹层，则滑坡堆积体的整体性将受影响，可能发生溃决。基于上述原因，仍然有必要对 Attabad 堰塞坝溃决危险性进行进一步分析。

溃口坝址最大流量根据肖克列奇 (Schoklitsch) 经验公式估算

$$Q_{b-\max} = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{B}{b} \right)^{\frac{1}{4}} b H_0^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

式中： $Q_{b-\max}$ 为溃口坝址最大流量 (m^3/s)； B 溃坝决口宽度 (m)； b 溃坝决口宽度 (m)； H_0 溃坝前上游水深 (m)。

溃坝址最大流量向下游演进距坝址 $L(\text{m})$ 流程处断面的最大流量可采用李斯特万公式估算：

$$Q_{L-\max} = \frac{W}{\frac{W}{Q_{b-\max}} + \frac{L}{V_{\max} K_2}} \quad (6)$$

式中： $Q_{L-\max}$ 为距坝址 $L(\text{m})$ 流程处断面的最大流量 (m^3/s)； W 为滑坡堰塞湖水体体积 (m^3)； L 为计算断面距水库坝址的距离 (m)； V_{\max} 为河道洪水期断面最大平均流速 (m/s)，在有资料地区可采用实测最大值，无资料时，一般山区可取 $3.0 \sim 5.0 \text{ m}/\text{s}$ ，半山区可取 $2.0 \sim 3.0 \text{ m}/\text{s}$ ，平原区可取 $1.0 \sim 2.0 \text{ m}/\text{s}$ ； K_2 为经验系数，山区取 $1.1 \sim 1.5$ ，丘陵区取 1.0 ，平原区取 $0.8 \sim 0.9$ ，考虑 Attabad 堰塞湖下游为山区河道形态，本文中取 $V_{\max} = 4.0 \text{ m}/\text{s}$ 、 $K_2 = 1.25$ 。

表 3 Attabad 堰塞湖溃决洪峰流量的计算 (坝高 80 m)

形式	溃决	溃坝前上游水库总库容	溃坝决口	溃口坝址最大流量				
					水深 H_0/m	$W/\text{万 m}^3$	平均宽度 b/m	$Q_{b-\max}/(\text{m}^3/\text{s})$
1/2	40	3092.24	166	27923				
1/3	27	1377.15	128	12523				
1/4	20	756.29	107	6936				

表 4 Attabad 堰塞坝洪水演进计算 (坝高 80 m)

位置	溃口下游	最大流量/(m^3/s)		
		1/4 溃决	1/3 溃决	1/2 溃决
K655 + 817	1.5	6887	12365	27153
K641 + 910.55 (桥)	12.3	6557	11340	22653
K607 + 283.6 (桥)	32.0	6029	9849	17395
K586 + 700	51.15	5592	8733	14192
K578 + 377	59.9	5413	8304	13091
K572 + 700	65.7	5300	8041	12451
K547 + 700	95.8	4742	6822	9753
吉尔吉特钢桥	100.1	4717	6772	9651

3 结论与讨论

3.1 结论

滑坡堰塞湖是高区常见的次生山地灾害之一。本文以巴基斯坦境内中巴公路交通干线上典型的 Attabad 滑坡堰塞湖为例，结合 Attabad 堰塞坝坝体物质组成，堰塞湖上游河道比降，堰塞湖上游来水特点，以及堰塞湖下游河道地形特征，分析了上游来流输沙率及泥沙颗粒级配，揭示了堰塞湖

泥沙淤积规律，评估了堰塞湖溃决洪水对下游中巴公路的影响，得到以下结论。

(1) Attabad 堰塞湖水源主要来自主河 Hunza 河及 Batura 冰川融水、Pasu 冰川融水和 Ghulkin 冰川融水等三条支流，各干支流贡献率分别为 55.50%、27.41%、10.25%、6.84%；Attabad 堰塞湖上游来流中泥沙平均含量约为 1.63 g/L ，干流 Hunza 河携带的固体颗粒物质是 Attabad 堰塞湖淤积的主要物质来源，占整个淤积量的 77.64%；泥沙颗粒级配中 $0.01 \sim 0.05 \text{ mm}$ 的粉砂含量约占库区淤积物质总量的 42.01%；

(2) Hunza 河的丰水期主要集中在 6~9 月，6~9 月的平均流量约为 $207.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，利用人工大坝库区泥沙淤积平衡法，分析得到 Attabad 堰塞湖的回水长度约为 18.03 km ，因泥沙淤积而导致回水上延 4.48 km ，在泥沙淤积过程中可能威胁既有中巴公路(沿河段)；

(3) Attabad 堰塞坝中大块石，可以在一定程度上提高堰塞坝的抗冲蚀能力，增强堰塞坝的稳定性，加之较长的沿河堆积坝体，大大降低了堰塞坝发生全溃的机率，但是受 Attabad 堰塞坝底部特有的软弱淤泥夹层，潜在地震、极端降雨、冰湖溃决洪水、冰滑坡涌浪等因素的影响，仍然可能导致堰塞坝溃决；

(4) 本文借助于较为成熟溃决峰值流量计算公式及溃决洪水演进公式，结合 Attabad 堰塞坝上下游实际地形地貌，分析了堰塞坝发生 1/4 溃决、1/3 溃决、1/2 溃决情景模式下，Attabad 堰塞坝的溃决峰值流量和流量沿程变化规律，为下游地区溃决洪水的应急避险及风险评估提供数据支撑。

3.2 讨论

本文在已有监测数据基础之上，尝试将人工水库泥沙淤积预测经验公式用于分析滑坡堰塞湖泥沙回淤长度及上延距离，从计算结果看上延距离占回淤长度的 26.44%，说明泥沙淤积上延对公路的影响作用不可忽视。由于山区地形地貌、沟床比降、上游来流中的泥沙颗粒物质组成和颗粒级配等，与平原区人工水库都存在很大的差异性，目前对堰塞湖库区泥沙淤积特征、库区泥沙淤积演化规律、库区泥沙淤积对沿河交通工程的影响等的研究仍不深入，尚需要开展大量的研究工作，进一步揭示堰塞湖库区泥沙淤积 - 演化发展规律，为山区沿河交通工程的设计与选线提供参考。

针对滑坡堰塞湖溃决研究，本文利用目前较为成熟溃决峰值流量计算公式及溃决洪水演进公式，分析了不同溃决情景模式下，Attabad 堰塞坝的溃决峰值流量和流量沿程变化规律。溃决洪水演进公式主要考虑一定堰塞湖库容在溃决坝发生后溃决洪水流量沿程演进规律，溃决洪水一般是清水，没有考虑库区泥沙随着溃决洪水的运动规律。由于 Attabad 堰塞湖已形成多年，库区已淤积了大量泥沙，如果发生溃决，库区泥沙在溃决洪水作用下如何运动？这种高固体颗粒含量的固 - 液两相流(高含沙水流或者泥流)沿程演进规律？溃决峰值流量如何计算？仍然需要进一步开展深入的研究。

参考文献:

- [1] 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, 30(2): 45–51.
- [2] WILTSHERE A J. Climate change implications for the glaciers of the Hindu-Kush, Karakoram and Himalayan region [J]. Cryosphere, 2014, 8(3): 941–958.
- [3] 崔鹏, 胡凯衡, 陈华勇, 等. 丝绸之路经济带自然灾害与重大工程风险[J]. 科学通报, 2018, 63(11): 989–997.
- [4] 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.
- [5] 杨志全, 朱颖彦, 廖丽萍, 等. 中巴公路沿线溜石坡[J]. 地质科技情报, 2013, 32(6): 175–180.
- [6] Cook N, Butz D. The Attabadlandslide and everyday mobility in Gojal, northern Pakistan[J]. Mountain Research & Development, 2013, 33(4): 372–380.
- [7] F Hussain Shan, MNaseem Baig. Taming the monster – Attabad-landslide dam [J]. Journal of Environmental Treatment Techniques, 2013, 1(1): 46–55.
- [8] Ali S, Schneiderwind S, Reicherter K. Structural and Climatic Control of Mass Movements Along the Karakoram Highway[C]// The Workshop on World Landslide Forum. Springer, Cham, 2017: 509–516.
- [9] 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, 35(3): 354–358.
- [10] CHANG D S, ZHANG L M, XU Y, et al. Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake[J]. Landslides, 2011, 8(3): 321–332.
- [11] ZHAO T, DAI F, XU N W. Coupled DEM–CFD investigation on the formation of landslide dams in narrow rivers[J]. Landslides, 2016: 1–13.
- [12] 袁晶, 许全喜, 童辉. 三峡水库蓄水运用以来库区泥沙淤积特性研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 139–174.
- [13] 李文杰, 杨胜发, 付旭辉, 等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 676–685.
- [14] 李文杰, 李娜, 杨胜发, 等. 基于挟沙力的三峡水库泥沙淤积形态分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 726–734.
- [15] PISANIETTO J D, Dam T T, Tingeyholoak J L. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 1141–1153.
- [16] HOOSHYARIPOR F, TAHERSHAMSI A, BEHZADIAN K. Estimation of peak outflow in dam failure using neural network approach under uncertainty analysis[J]. Water Resources, 2015, 42(5): 721–734.
- [17] 陈晓清, 赵万玉, 高全, 等. 人工结构体控制堰塞湖溃决洪峰的试验与设计[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 228–235.
- [18] KARGEL J S, LEONARD G, CRIPPEN R E, et al. Satellite monitoring of Pakistan's rockslidE-dammed lake Gojal[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, 91(43): 394–395.
- [19] 杨霞, 李建华, 朱玲玲. 三峡水库库区香溪河河口泥沙淤积特性研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(4): 60–67.
- [20] 李孟洋, 陈樸, 傅开道, 等. 基于历史输沙率的水库悬移质泥沙淤积计算[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 995–1000.
- [21] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181–189.
- [22] MACDONALD T C, LANGRIDGE-MONOPOLIS J. Breaching characteristics of dam failures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(5): 567–586.
- [23] ZHU Yonghui, VISSER P J, VRIJLING J K, et al. Experimental investigation on breaching of embankments. Sci China Tech Sci, 2011, 41(2): 150–157.
- [24] ERMINI L, CASAGLI N. Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphologic dimensionless index[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28: 31–47.
- [25] 陈晓清, 崔鹏, 程尊兰, 等. 汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 242–249.
- [26] 李念杰, 蔡祥兴, 李械. 喀喇昆仑山巴托拉冰川水文某些特征的探讨[J]. 冰川冻土, 1981, 3(2): 41–44.

The Effects of Secondary Disasters of Attabad Landslide Blocking River on China-Pakistan Highway

CHENHuayong^{1,2,3}, CHEN Xiaoqing^{1,2,3}, ZHAO Wanyu¹, and LUO Zhigang⁴

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Land Surface Processes/Inst. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China; 4. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100000, China)

Abstract: Based on the field investigation of Attabad landslide dams and the analysis results of incoming water and sediment data in the upper reaches of the dammed lake, and the empirical relationship of sediment deposition balance in the artificial reservoir area, the length of sediment deposition and the distance of sediment deposition in the reservoir area of the landslide dammed lake are analyzed. By using the formula of peak burst discharge, the peak burst discharge of the barrier lake is calculated, and the variation law of flood discharge along the break is studied. The results show that the average sediment content in the upstream inflow of Attabad barrier lake is about 1.63 g/L. Among the main branches, the solid particulate matter carried by Hunza River is the main source of sediment in Attabad barrier lake, accounting for 77.64% of the total sediment. Under the condition of 81.3 m water depth of the barrier lake, the backwater length of Attabad barrier lake is about 18.03 km. The backwater is delayed by 4.48 km due to sediment deposition. Based on the empirical formula of the maximum discharge at the site of Shockledge breach, the peak discharge of 1/4 breach, 1/3 breach and 1/2 breach scenarios of Attabad dam are evaluated, which are 27923 m³/s, 12523 m³/s and 6936 m³/s, respectively. This study can provide reference for highway route selection design and risk assessment of outburst floods in the downstream area of the barrier lake reservoir area.

Key words: Attabad landslide; secondary disasters; China-Pakistan highway; sediment deposition; burst flood