

西藏终碛湖溃决形式研究

刘晶晶^{1,2}, 程尊兰^{1,2}, 李泳^{1,2}, 罗曦³

1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041
2. 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
3. 广东蓄能发电有限公司, 广东 广州 510630

Liu Jingjing^{1,2}, Cheng Zunlan^{1,2}, Li Yong^{1,2}, Luo Xi³

1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China
3. Guangdong Pumped Storage Co. Ltd, Guangzhou 510630, China

Liu Jingjing, Cheng Zunlan, Li Yong, et al. A study of the outburst form of the end-moraine lake in Tibet. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 372-380

Abstract: Many end-moraine lakes are distributed in Tibet. Once any of these lakes outbursts, this region will undergo a huge loss. So studying the outburst mechanism is essential for forecast and assessment of the disaster. In this paper, the end-moraine dam is considered as a natural dam and the outburst of end-moraine lake is researched in terms of hydraulics and soil mechanics. According to field observations and previous researches, our study focuses on the overflow and piping-break types of outburst. It is found that the dyke breach in the overflow type usually has the shape of an arc or a trapezoid. From the field observations, we have found a relationship between the height and the open width of the breach. Almost all end-moraine lakes collapse partially. Based on field surveys and sampling analysis, we have determined the possible ways of collapse of the Guangxieco end-moraine lake by infiltration.

Key words: Tibet; end-moraine lake; outburst form

摘要: 西藏终碛湖众多, 一旦发生溃决, 将造成巨大损失。冰湖溃决机制的研究对冰湖溃决预测和溃后灾害评估是十分必要的。将冰湖终碛堤视为天然堆石坝, 用水力学和土力学理论研究冰湖溃决的力学机制。重点研究溢流型溃决形式和管涌型溃决形式, 根据野外观测数据和前人的研究, 发现溢流型溃决的溃口多呈梯形或圆弧状形, 对比真实数据发现溃口顶宽与坝高的关系, 并且所有冰川终碛堤都表现为局部溃决。通过实地考察、取样分析, 判断光谢措终碛堤的可能渗透破坏形式。

关键词: 西藏; 终碛湖; 溃决形式

中图分类号: X43 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2009)04-0372-09

0 引言

20世纪80年代以来的快速升温, 使得大量冰

川退缩加速, 冰川融水径流量也呈加速增大的趋势。冰川表面粒雪特征和冰川成冰带对气候变化十分敏感, 同时气候变暖对冰川的消融起强烈加速作用。自20世纪90年代以来, 我国境内大多数冰川普遍

转入后退阶段,特别是高原边缘的藏东南山区、横断山脉、喜马拉雅山等山区冰川强烈退缩^[1-4]。

由于冰川以超常速度消融退缩,更多的冰川融水注入冰川下的湖泊中,使冰碛湖面积扩张并且不断生成新湖泊,冰川融水量也迅速增加,在这样的情况下冰湖潜在的溃决危险性也随之增加。

我国西藏地区是冰湖溃决及其次生灾害的重点分布区。喜马拉雅山区近 50 年来至少已有 20 余次较大的冰湖溃决事件,其中四分之三发生在我国西藏境内^[5-7]。冰湖溃决属低频率事件,但一旦发生,引发的洪水往往对下游生命财产造成巨大灾害^[8-9]。因此,冰湖溃决及其相伴的洪水和泥石流问题,一直受到研究者的关注。例如,杨宗辉对冰湖溃决泥石流的形成和危害的分析^[10];徐道明等对危险冰湖及其溃决特征和灾害类型的分析^[11],以及对冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征的研究^[12];张祥松等^[13]考察新疆叶儿羌河,系统地分析了冰川洪水形成的自然地理条件,冰川进退变化与突发洪水的原因,以及冰川阻塞湖突发性洪水的排水机制。刘潮海等^[14]进行喜马拉雅山中段朋曲和波曲流域冰湖溃决洪水考察研究,并对该地区各种类型的高山冰湖进行调查、编目。Richardson 等通过对喜马拉雅山区 26 个冰湖溃决洪水的研究,提出了冰湖溃决 5 种激发因素,以及每种因素引起溃决所占的比例^[15]。Clague 等研究了不列颠哥伦比亚省的冰碛湖的灾难性泄流后,提出冰湖溃决的 6 种成因及相应的机制和减灾措施^[16]。同时,3S 技术也在这些问题中得到了应用,例如 Huggel 等运用 GIS 模型预测冰湖溃决灾害^[17],此外还加强了对冰湖溃决洪水峰值流量估算和减轻灾害的研究^[18-19]。总的来说,国外研究冰湖溃决,主要是从环境特别是气候和沉积等方面着眼,提出了不少确定和分析冰湖环境和泥石流特征的方法,而国内研究则侧重于冰湖溃决洪水转化为泥石流的现实过程和危害。目前多数研究在溃决机制方面较少有理论突破。

本文将冰湖终碛堤视为天然堆石坝,运用水力学和土力学理论研究冰湖溃决机制。依据西藏过去 50 年曾发生的终碛湖溃决事件,同现场考察资料结合,分析西藏终碛湖的溃决机制。

1 西藏终碛湖溃决形式

冰湖有多种,涉及现代冰川本身的有冰面湖、冰

内湖(水体)、冰坝湖(主谷冰川堵塞支谷沟口成湖,支冰川堵塞主谷成湖);涉及现代冰川退缩的有冰川终碛湖、冰蚀槽谷——冰碛湖、冰斗湖和侧碛阻塞之谷湖等等。据我们的考察,近百年西藏冰湖溃决都发生在冰川终碛湖^[9]。

1.1 终碛湖溃决表现形式

终碛湖溃决主要表现为以下几种形式:(1)漫顶溢流溃坝洪水,主要是漫顶流下切侵蚀,当侵蚀超过一定极限值时导致突然溃坝形成洪水;(2)管涌溃坝洪水,死冰体消融、渗透水流掏蚀等致使管涌流扩大,最终溃坝形成洪水;(3)瞬间溃坝洪水,由于地震等因素导致冰碛坝突然垮塌形成;(4)多种溃决机制组合,如加拿大哥伦比亚的 Queen Bess 湖溃决分两阶段,先是冰崩落入湖中产生漫顶洪水,然后漫顶洪水侵蚀作用导致冰碛坝溃决形成洪水,两股洪水在下游大约 7 km 处叠加到一起^[20]。

1.2 西藏冰湖溃决事件概况

自 20 世纪 30 年代以来,西藏地区多次爆发规模较大的冰湖溃决,不仅在国内造成巨大损失,并对下游地区,特别是印度、尼泊尔构成威胁。

近 50 年间,西藏地区已知共发生 23 起终碛湖溃决事件,其中有 17 次溃决事件有详细纪录。根据文献^[9]和近期野外考察,可以发现,西藏终碛湖的溃决事件,以 1、2 种形式为主,尤以第一种机制导致终碛堤的溃决最为常见。在记录的 17 次溃决事件中就有 14 次事件以这种方式发生。其余 3 次溃决由 1、2 种机制共同作用导致发生。所以在本文只讨论溢流型溃决(图 1)和管涌型溃决(图 7)两种溃决形式的力学机制。

2 溢流型溃决

溢流型溃决是最为常见的导致冰湖溃决的原因。过去 50 年,西藏境内溃决的 14 个冰湖最终全部都转化为溢流型的溃决。一般情况下,冰碛湖通过终碛堤的渗流与输入湖内的冰雪融水保持着水量平衡,当暖期冰雪融水增多时,则通过终碛堤最低处漫溢排出。一旦冰滑坡入湖,会使冰湖水面急剧上升,形成高于溢出口的溢流水头。在溢流水头足够高的情况下,形成的溢流流速大于溢出口泥沙的起动流速,溢流就会冲刷和下切终碛堤。如果堤坝下切速率大于溢流导致的湖水水位下降速率,则溢流口水头会随下切而增加,流速进一步增大,导致更快

和更强的冲刷下切,形成终碛湖在局部堤段的瞬时溃决。在少数情况下,因冰湖规模过小,或因终碛堤宽厚坚实,冰湖水位下降速率大于溢流口下切速率时,溢流水位逐步降低,流速减小,冲刷下切能力减弱,冲刷到一定深度时自动中止。在下次遇到强烈溢流时,继续下切,形成多次溃决。图1是冰滑坡入湖导致终碛堤发生溢流型溃决的示意图。

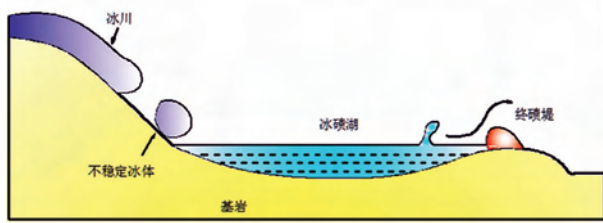


图1 溢流型溃决示意图^[7]
Fig.1 Sketch map of overflow burst

2.1 冰舌稳定性分析

冰崩、冰滑坡是造成溢流型溃决事件的主要原因。山坡上的冰舌失稳滑动入湖,致使湖水水位上升,并造成涌浪对终碛堤的冲击,导致溃决发生。在此对山坡上冰舌的稳定性进行研究是必要的。

坡面上的冰舌在重力作用下都有下滑的趋势,但由于冰川内部具有摩擦力及在积雪层内雪粒间还具有一定的内聚力,使其处于平衡。当下滑力大于阻力时,山坡上冰舌就会滑动形成冰崩、冰滑坡。为了便于分析,将冰舌简化为矩形断面,所受重力可分解为一个平行山坡的分力 T 和垂直于山坡的分力 N (图2):

$$T = \rho h \sin \alpha$$

$$N = \rho h \cos \alpha$$
(1)

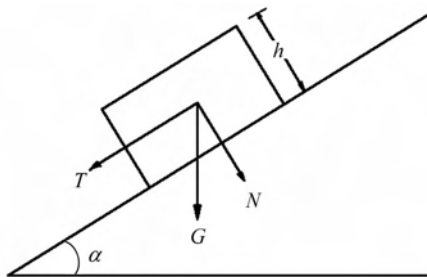


图2 冰舌受力图
Fig.2 Force analysis of glacier tongue

式中, ρ 为冰舌密度 (g/cm^3); h 为冰舌厚度 (cm); l 为山坡长度 (cm); α 为山坡坡脚 ($^\circ$); 支持冰舌免于滑动力取决于冰舌抗剪强度 τ :

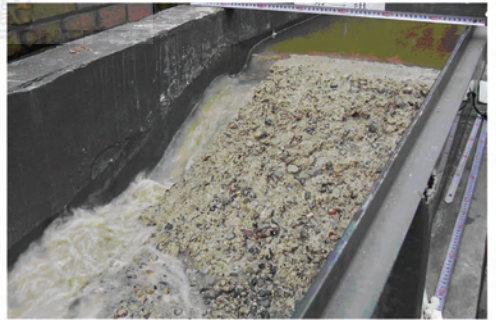


图4 堵塞坝溃决实验
Fig.4 Experiment of blocking dam outburst

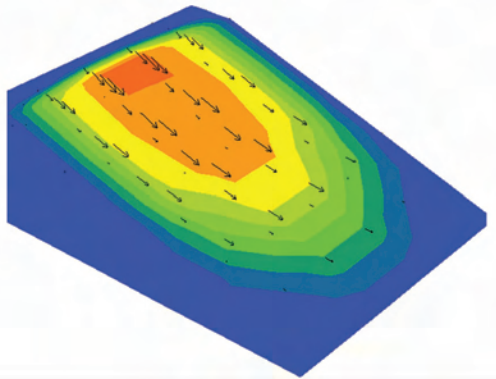


图5 溃坝模拟图
Fig.5 Simulation of outburst dam



图9 光谢措土样取样点(2007年)
Fig.9 Sampling point of soil in Guangxieco

$$\tau = c + p \operatorname{tg} \theta \quad (2)$$

式中, τ 为抗剪强度 (Pa); c 为冰舌与山坡间的内聚力 (Pa); p 为坡面所受冰舌的正压力 (Pa); θ 为冰舌与坡面间的内摩擦角 ($^{\circ}$)。坡面所受冰舌的正压力为

$$p = N/l = \rho h \cos \alpha \quad (3)$$

山坡上冰舌稳定平衡条件为

$$T \leq \tau l \quad (4)$$

由上式可得山坡冰舌层极限(或临界)厚度 h_k 为

$$h_k = c / [\rho (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \theta)] \quad (5)$$

当山坡冰舌厚度达到极限厚度 h_k 时, 冰舌层的下滑力与其阻力处于平衡状态。此时冰舌厚度的增大或内部力学强度降低, 均会引起冰舌的滑塌。极限厚度随着山坡坡度的减小而增大。当山坡坡度小于某一极限值时, 冰舌的极限厚度可以无限增大, 这个坡度角称为安全角, 可用下式计算

$$\cos \alpha_0 = [\sqrt{1 + f^2} / (1 + f^2)] - f_n / [98 \rho l (1 + f^2)] \quad (6)$$

式中, α_0 为安全角 ($^{\circ}$); f 为摩擦系数 ($f = \operatorname{tg} \theta$); f_n 为冰舌的抗断强度 (Pa)。

冰舌稳定性与山坡坡度之间有密切关系。在不同的山坡上, 厚度相等的冰舌, 有的发生运动, 酿成冰崩; 有的只在蠕动, 使冰舌处于潜在的冰崩、冰滑坡危险状态。

目前, 冰舌的物理参数较难通过遥感判读和现场考察取得。

2.2 溃口方式

当溢流造成溃坝时, 过坝水流在坝面产生的过大剪应力会引起冲刷过程。当局部剪应力超过临界值时, 冲刷发生, 土颗粒被带走。产生的任何小的初始溃口都是薄弱部位, 此处剪应力比周围更高, 因此可能会迅速发展, 形成巨大的决口。溃口的外形取决于漫顶持续时间以及终碛堤本身特性和形状^[21]。

过去认为溃口形状呈矩形、三角形或梯形(图3)^[22]。而大量的天然坝溃决事件及模型试验证明溃口断面的形状易为圆弧形。这里将其简化为等腰梯形, 以便于计算。假定底宽 b 为常数, 溃口仅沿垂向扩展。则梯形的断面面积为^[22-23]

$$A_b = b(H - Z) + S(H - Z)^2$$

其中 S 为梯形边坡, H 为高, Z 为水深。

如果漫顶持续时间较短, 冲刷可能很轻微, 溃口

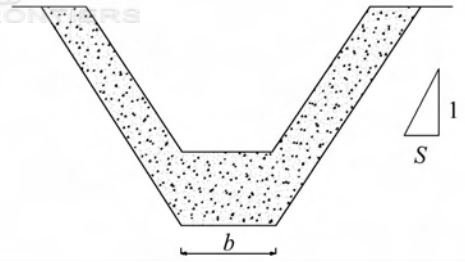


图3 梯形溃口的侵蚀方式

Fig. 3 Erosion mode of trapezoidal breach

就不会迅速发展。溃口的位置出现在材料压实相对最薄弱的位置, 从溃坝模拟图(图5)和现场试验堵塞坝溃决图(图4)中, 我们可以看到, 最大沉降常常出现在大坝顶部, 因为该部位漫顶时往往承受最大水深, 溃口通常在坝体顶部形成。从溃坝模拟图中, 若假定坝的材料均匀, 可以看到应力集中区较易出现在坝顶中部。当然这在实际中是较为少见的, 所以在实际发生的溃决事件中, 溃口并非在中部出现, 而在材料最薄弱的地区, 溃口多呈梯形或圆弧状, 顶宽为坝高的3~5倍。例如, 表1是实测的两个冰湖溃决的几何参数。

表1 真实事件溃口参数

Table 1 Parameters of breach in real event

名称	终碛堤高/m	溃口顶宽/m	溃口底宽/m
达门拉咳错	17	50	12
次仁玛错	50	230	40

2.3 部分溃决模型

一般湖泊溃决口洪峰流量的大小与溃坝前上、下游水深和坝址断面形状及尺寸有关, 其计算方法则取决于瞬间全部溃决、逐渐溃决和瞬间部分溃决溃坝形式, 前两种情况的计算方法已较成熟^[24]。我们重点讨论瞬间部分溃决, 这是绝大多数冰湖溃决的方式。

终碛堤溃口形成过程是水文学、水动力学、挟沙动力学和土力学等的综合过程, 也是水、土两相介质相互作用的过程。逐渐溃决的情形下, 溃口的形成过程可以显著的分为两个阶段。在溃口形成的初始阶段, 坝体尚未失事, 坝体的出流量也很小, 由少量的漫顶流量和逐渐发展的管涌或渗流流量组成。而在溃口形成之后的发展阶段, 溃口出流和冲刷都急剧增大, 溃口扩大速度加快。

部分溃坝的过程主要涉及以下几个方面:(1)从冰湖通过坝体溃口泄出的水流, 通过冲刷和坍塌而

导致溃口的扩大,这一过程将持续到冰湖放空或者坝体能抵抗水流的进一步冲刷为止;(2)溃口的形成历时主要取决于外泄的水流对终碛堤土样的冲刷,与堤高、土样的密实程度及漫顶泄流状况紧密相关;(3)溃口在横向、垂向同时发展变化,随着时间的推移,由于斜坡失去稳定性导致的坍塌而引起坝顶部溃口逐渐扩大^[24]。

冰川终碛湖堤坝的局部溃决以横向(沿坝长方向)溃决较为普遍,如图6。同样假设平底、无阻力河道外,还假定坝轴线垂直于流向、溃口顶部近水平、坝前水体静止,堰塞湖水面高程在负波通过后即维持不变。此时局部溃口宽度为 b ,残留坝高为 a 。

图6 堤坝溃决断面示意图^[25]
Fig. 6 Sketch map of dyke burst section

参照西藏境内的溃决事件^[9,25],23次溃决都以图6b为主。这是因为终碛堤的厚度沿长度不同,承受溢流水的冲击力的能力也是不同,一旦溃口形成,洪水迅速下泄,这样保留下部分终碛堤残留^[26]。

对于冰湖溃决,由于湖内冰所携带的冰碛物和溃决口土体的加入,向下游排泄的不再是单一的洪水,而是一种水和土体的混合体泥石流。所以冰湖溃决口洪峰不是单一的洪水洪峰,而是泥石流的洪峰^[27]。泥石流的洪峰流量不但与单一洪水洪峰流量有关,而且还与溃决时加入土体的量以及土体与水相互作用关系有关。

3 管涌型溃决

根据土力学理论,渗透变形可分为流土型、管涌型和两者之间的过渡型。流土指渗流作用下饱和的粘性土和均匀砂类土,在渗流出逸坡大于土的允许坡降时,土体表层交换时被渗流顶托而浮动的现象。流土通常发生在天然堆石坝下游地基的渗流出逸处,而不发生在坝基土壤内部。

管涌是指土层中细颗粒在渗流作用下,从粗颗粒孔隙中被带走或冲出的现象。管涌对天然堆石坝的危害,一是被带走的细颗粒,将使渗漏情况恶化;二是细颗粒被带走,使坝体或坝基产生较大沉陷,破坏天然堆石坝的稳定。冰湖管涌型溃决破坏即是此种渗透破坏方式。由于冰湖的管涌通常发生在土体内部,故又可称为渗流引起的潜蚀现象。

死冰体消融,发生潜蚀。潜蚀使土石结构变松,强度下降,土石发生渗透变形。强烈的渗透变形会在渗流出口处侵蚀成空洞,空洞又会促使渗透路径变短、水力梯度有所增大,在空洞末端集中的渗透水流就具有更大的侵蚀力,所以空洞就不断沿最大水力梯度线溯源发展,最终形成水流集中的管道,由管道中涌出的水携带出大量的土颗粒,从而形成管涌(图7)。根据西藏过去50年的历次溃决事件,发现其中有3次溃决事件,管涌是溃决原因之一。而单纯以死冰体的消融而导致终碛堤管涌破裂,在溃决事件中未发生过。这或许由于终碛堤坝同天然堆石坝的相似性所造成的,组成终碛堤的大块石较多,渗透能力很强,块石不易被渗流带出。

管涌导致溃决的事件不多,最近一次事件发生在1988年的光谢措溃决,所以我们将光谢措冰湖作为重点研究对象。对冰碛物土样进行分析,试图了解当年光谢措发生管涌溃决的过程。

3.1 光谢措冰湖溃决事件

光谢措冰湖终碛堤平均高度45 m,堤身最薄处的堤顶宽度30余 m,该堤右侧二道堤终碛宽度近80 m,长度320 m,背水坡坡度为577‰,坝顶由粘土到粗粒物质混杂而成,细颗粒所占比重较大,约80%,相当于一座天然土石坝。坝体渗透性能一致。渗透能力极强,最大可达每天数 m^3 。

当初,湖水既从坝体中部溢流,又自左侧渗出,据20世纪80年代航片判读,湖水还曾从左侧坝顶溢流,到20世纪80年代初湖水以潜流为主。1980年7月14日晚11时许,湖区发生大量冰川体崩落,使当地农牧民感到如地震一样的振动,湖水水位陡涨并形成涌浪,坝前水深即上涨了3~4 m。此时,左侧坝体不能承受额外的水体静压和动压力,突然垮塌而形成溃决^[28]。光谢措坝体属局部瞬时全溃,坝内水体从决口处急泄而出构成溃坝洪水。

3.2 冰湖土样选取

冰川侵蚀产生的大量松散岩屑和由山坡上崩落下来的碎屑,进入冰川体后,随冰川运动向下游搬

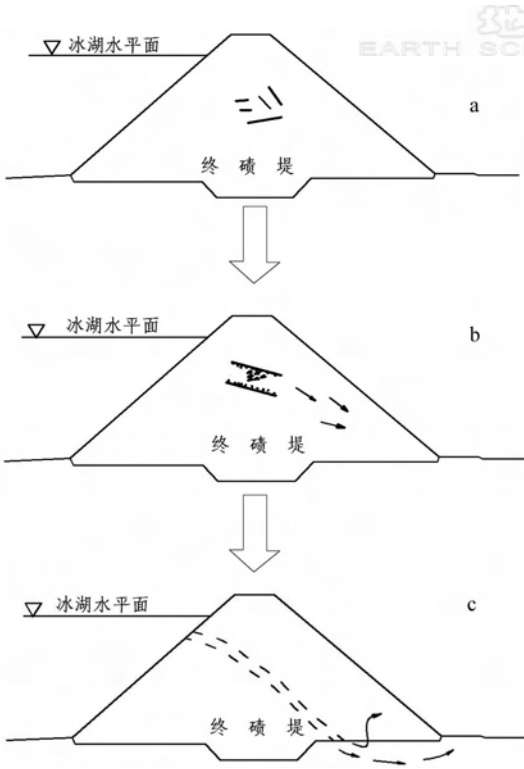


图7 管涌型溃决示意图

Fig.7 Sketch map of piping-break outburst

a—终碛堤内埋藏冰融化,并在堤内部出现渗流;b—渗漏从堤内进入坝基,堤内被冲刷的土粒进入坝基时反向冲刷开始;c—反向冲刷发展形成管涌,产生破坏

运。这些被搬运的岩屑叫冰碛物。在冰川末端由于冰舌消融变薄,冰川运动速度降低,但其上游方速度较快的冰不断向前推挤,形成剪切破裂面,冰川沿破裂面向上滑动,并把冰碛物带到冰川表面。所以对冰川表碛的土样分析,有利于我们了解冰川底部运动。而侧碛和终碛堤的土样特性,直接关系到渗透破坏的形式,由于曾发生的光谢错溃决是在终碛堤左侧,所以对终碛堤左侧取样为重点。内碛和底碛取样困难,所以这里我们主要对冰川表碛、侧碛和终碛堤进行土样分析。

我们在光谢措现场考察时,对贡扎冰川现代冰川表碛 GX1、光谢措冰川左侧侧碛 GX2 和光谢措终碛堤左侧取样 GX3(图 9)。

表2 取样地点

Table 2 Sampling point of soil

取样编号	地点	海拔/m	经纬度
GX1	现代冰川表碛	3 840	N29.4521°E96.5007°
GX2	冰川左侧(西 100 m)	3 926	N29.4500°E96.5008°
GX3	终碛堤左侧取样	3 820	N29.4512°E96.5026°

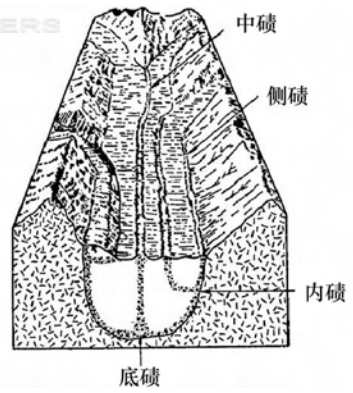


图8 冰川搬运类型

Fig.8 Type of glacial transit

3.3 土样分析

由于光谢措溃决距今 20 年,并且当年为局部溃决,所以残留部分的终碛堤土样组成与当年相差不大,我们将终碛堤样品与冰川表碛与侧碛对比进行分析,图 10 是各样本的颗分曲线。

土的级配对渗透破坏形式有很大影响。通常用不均匀系数(C_u)和曲率系数(C_c)两个指标来描述土体的级配特征,分别定义为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (8)$$

其中 d_{10} 为级配曲线中小于 10% 的相应粒径,依此类推。 C_u 还可以用孔隙平均直径(D_0)来计算:

$$D_0 = 0.25C_u^{1/8}d_{20} \quad (9)$$

以上 3 个土样的计算结果如表 3。冰川表碛 GX1、侧碛 GX2 和终碛堤的土样 GX3 都无粘粒成分,是由砂土和砂砾石构成。其中 GX3 属于不良级配的砾、砾砂混合物。

表3 光谢措取样的粒径分布

Table 3 Size distribution of Guangxi措's sampling

土样编号	粒径/mm			C_u	C_c	备注
	d_{60}	d_{10}	d_{30}			
GX1	6.5	1.5	0.18	36.1	1.92	级配良好
GX2	6	1.2	0.15	40	1.6	级配良好
GX3	28	6	0.3	93.3	4.29	级配不良

根据土体的级配,可以推断其渗透破坏形式。通过孔隙平均直径(D_0)进行判断(表 4),发现冰川表碛良好,可能的破坏形式为介于管涌和流土之间的过渡型,冰川侧碛级配良好,可能的破坏形式为流土,而光谢措终碛堤级配不良,较易发生管涌,这与

当年的破坏形式相符合。虽然终碛堤级配有发生管涌的可能性,但在 2007 年的考察过程中,暂未发现光谢措终碛堤出现渗漏。

表 4 光谢措可能发生的渗透破坏形式

Table 4 Possible forms of infiltration sabotage in Guangxieco

土样编号	粒径/mm			Cu	D ₀ /mm	可能破坏形式
	d ₃	d ₅	d ₂₀			
GX1	0.02	0.08	0.7	36.1	0.274	过渡型
GX2	0.06	0.08	0.4	40	0.159	流土
GX3	0.05	0.1	2.5	93.3	1.10	管涌

3.4 管涌破坏过程

确定了渗透破坏的形式后,主要关注的是初始管涌形成以后的发展过程。假定终碛堤内存在一初始穿坝通道,用孔流方程计算通过通道的水流:

$$Q_b = A \sqrt{2g(H - H_p) / H_L} \quad (10)$$

式中 Q_b 为流经通道的流量;g 为重力加速度;A 为通道横断面面积;H 为终碛堤水位(头);H_p 为管涌通道中心线高程;H_L 为由于摩擦和收缩产生的水头损失:

$$H_L = \left(0.05 + \frac{fL}{D}\right) \quad (11)$$

式中 f 为 D₅₀ 作用时确定的摩擦系数;L 为通道长度;D 为通道直径;0.05 为收缩损失系数, Fread^[29] 利用简化方法模拟通道的不断扩大,即根据某一特定时间步长内的冲蚀沙量(V_s),认为通道沿其长度均匀增大,V_s 可通过下式进行计算:

$$V_s = Q_s t \quad (12)$$

管涌通道上方坝体下游面物质崩落随着管涌通道的逐渐扩大,下游面的土体慢慢落入通道内并随水流冲走。计算坝体楔块重量和土压力的比值,如果比值小于 1,则认为管涌通道顶部土楔体是不稳定的^[30]。

由于下游坝体土体不断崩落掉进管涌通道,管涌通道以上坝体宽度逐渐减少。如果水压力大到超过管涌通道以上坝体材料的抗剪强度,那么通道以上坝体楔块将滑落,但也有可能是因其自身重量而垮塌。

由于管涌发生在坝体内部,不易观测,所以其真实过程不易了解。上述公式仅能推断可能的内部水流发展过程。

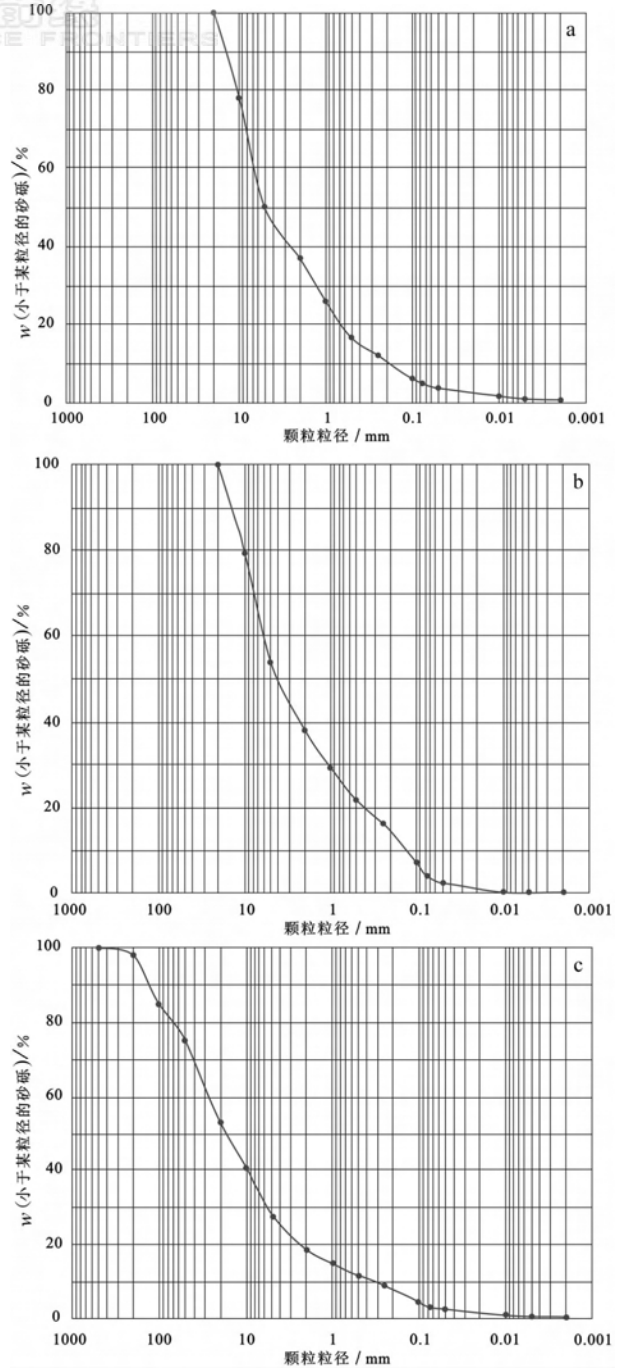


图 10 光谢措冰川表碛、侧碛和终碛取样

Fig. 10 Samplings of Guangxieco's supraglacial moraine, lateral moraine and end moraine

a—光谢措冰川表碛取样; b—光谢措冰川侧碛取样; c—光谢措冰川终碛取样

4 结论

通过分析过去 50 年西藏境内的终碛湖溃决事件,发现所有事件都以漫顶流溃坝或管涌溃坝的形

式发生。而溢流型溃决是最为常见导致冰湖溃决的原因,17次溃决事件中,最后都发展为溢流型溃决。溢流型溃决的溃口通常在坝体顶部形成,溃口多呈梯形或圆弧状形,对比真实数据发现溃口顶宽为坝高的3~4倍,并且所有冰川终碛湖堤坝都表现为局部溃决。

管涌型溃决形式在溃决事件中较为少见,而且通常都伴随溢流型溃决。根据对光谢措冰碛物的土样分析,发现管涌的主要原因在于终碛堤土体的颗粒级配不良。经过现场考察,目前光谢措终碛堤并未有管涌迹象,排水口正常,若没有阻塞发生,依据光谢措目前的规模,一般不可能再次发生溃决。

西藏终碛湖溃决事件是近年来逐渐引起人们重视的灾害形式,对于终碛湖溃决形式的研究是后期冰湖溃决灾害评估、预测和溃决判别的理论基础。

References:

- [1] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change; Evidence from small glacier[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97(4): 1406-1411.
- [2] Haeberli W, Barry R, Cihlar J. Glacier monitoring within the global climate observing system[J]. Annals of Glaciology, 2000, 31: 241-246.
- [3] National Research Council. Decade-to-Century-Scale Climate Variability and Change; A Science Strategy[M]. Washington DC: National Academy Press, 1998: 144-151.
- [4] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M, et al. Recent warming; Ice core evidence from tropical ice cores with emphasis upon central Asia[J]. Global and Planetary Change, 1993, 7(1-3): 145-156.
- [5] Xu D M, Feng Q H. Mud-rock flow and glacier lake outburst disaster research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 3(10): 284-289(in Chinese).
- [6] Cui P, Ma D T, Chen N S, et al. Glacial lake outburst debris flow formation, evolution and mitigation measures[J]. Quaternary Research, 2003, 23(6): 621-627(in Chinese).
- [7] Liu J J, Cheng Z L, Li Y, et al. Characteristics of glacier-lake breaks in Tibet[J]. Disaster Science, 2008, 23(1): 55-60(in Chinese).
- [8] Qinghai-Tibet Plateau Comprehensive Scientific Expedition Team, Chinese Academy of Sciences. Tibet's Glaciers[M]. Beijing: Science Press, 1986: 55-60(in Chinese).
- [9] Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences-Ministry of Water Resources; Institute of Science, Traffic Department of the Tibet Autonomous Region. Mud-Rock Flow in Tibet and the Environment [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1999: 106-136(in Chinese).
- [10] Yang Z H. Sichuan-Tibet Highway to force long trench large debris flow disaster documentary[C]//Debris of the Second National Conference Papers. Beijing: Science Press, 1991: 252-254(in Chinese).
- [11] Xu D M, Liu C H, Feng Q H. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Himalayas[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(3): 342-352(in Chinese).
- [12] Xu D M. Tibet Boqu River and the formation of glacial lake outburst debris flow characteristics of the deposition[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(1): 23-24(in Chinese).
- [13] Zhang X S, Zhou Y C. The Study of Glacier Lake Outburst Floods[M]. Beijing: Science Press, 1989: 51-121(in Chinese).
- [14] Liu C H, Sharma C K. Report on First Expedition to Glaciers and Glacier Lakes in the Pumqu (Arun) and Poiqu (Bhote-sun Kosi) River Basins, Xizang (Tibet), China[M]. Beijing: Science Press, 1988: 1-192.
- [15] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65(6): 31-47.
- [16] Clague J J, Evans S C. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(17-8): 1763-1783.
- [17] Huggel C, Kaeab A, Haeberl W, et al. GIS-based models for glacier lake outburst hazards; Evaluation and application for recent events in the Swiss Alps[J]. Geophysical Research Abstracts, 2003, 5(3): 36-44.
- [18] Hromadka T V, Berenbrock C E, Freckleton J R. A two-dimensional dam-break flood plain model[J]. Advances in Water Resources, 1985, 8(1): 7-14.
- [19] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and climatic floods in the Mount Everest Region, Nepal[J]. Geomorphology, 2001, 40(1-2): 57-90.
- [20] Wang X, Liu S Y. An overview of researches on moraine-dammed lake outburst flood hazards[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 19(4): 626-635(in Chinese).
- [21] Lancaster S T, Grant G E. Debris dams and the relief of headwater streams[J]. Geomorphology, 2006, 82(1-2): 84-97.
- [22] Zhu Y H, Liao H Z, Wu Z R. Review on oversea earth-dam-break modeling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(3): 26-29(in Chinese).
- [23] Kuang S F. Formation mechanisms and prediction models of debris flow due to natural dam failures[J]. Journal of Sedi-

ment Research, 1993, 12(4): 42-57(in Chinese).

- [24] Guo H W, Wu C C. Comparison and research between gradual and instantaneous dam break mathematical model [J]. Water Resource Hydropower of Northeast China, 2000, 1 (2): 1-3(in Chinese)
- [25] Chen X Q, Chen N S, Cui P. Calculation of discharge of debris flow induced by glacier lake outburst[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 357-361(in Chinese).
- [26] Reynolds J M. Glacial-lake outburst (GLOFs) in the Himalayas: An example of hazard mitigation from Nepal[J]. Geoscience and Development, 1995, 2: 6-8.
- [27] Rudoy A N. Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains [J]. Quaternary International, 2002, 87: 119-140.
- [28] Li D J, You Y. Bursting of the Midui moraine lake in Bomi, Xizang[J]. Journal of Mountain Research, 1992, 10(4): 219-224(in Chinese).
- [29] Fread D L. BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures, National Weather Service [R]. Maryland: Silver Spring, 1988.
- [30] Li G X, Zhou X J. Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 102-106(in Chinese).
- [7] 刘晶晶,程尊兰,李泳,等. 西藏冰湖溃决主要特征[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 55-60.
- [8] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 55-60.
- [9] 中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 106-136.
- [10] 杨宗辉. 川藏公路迫龙沟特大泥石流灾害纪实[C]//第二届全国泥石流学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 252-254.
- [11] 徐道明,刘潮海,冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 342-352.
- [12] 徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流形成和沉积特征[J]. 冰川冻土, 1987, 9(1): 23-24.
- [13] 张祥松,周聿超,喀喇昆仑山叶尔羌河冰川湖突发洪水研究[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 51-121.
- [20] 王欣,刘时银. 冰碛湖溃决灾害研究进展[J]. 冰川冻土, 2007, 19(4): 626-635.
- [22] 朱勇辉,廖鸿志,吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(3): 26-29.
- [23] 匡尚富. 天然坝溃决的泥石流形成机理及其数学模型[J]. 泥沙研究, 1993, 12(4): 42-57.
- [24] 郭洪巍,吴葱葱. 逐渐溃坝和瞬时溃坝的模拟研究与比较[J]. 东北水利水电, 2000, 1(2): 1-3.
- [25] 陈晓清,陈宁生,崔鹏. 冰川终碛湖溃决泥石流流量计算[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 357-361.
- [28] 李德基,游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J]. 山地研究, 1992, 10(4): 219-224.
- [30] 李广信,周晓杰. 堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 102-106.

参考文献:

- [5] 许道明,冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究[J]. 冰川冻土, 1988, 3(10): 284-289.
- [6] 崔鹏,马东涛,陈宁生,等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与