

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0404

Aruhan, TU Jienan, LIU Hongyan, et al. Numerical simulation of the glacier lake surge based on Fluent: a case study of Jialong Co, Nyalam County, Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 837-845. [阿如汉, 涂杰楠, 刘红岩, 等. 基于 Fluent 数值模拟的冰湖涌浪分析: 以西藏聂拉木县嘉龙错为例[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 837-845.]

基于 Fluent 数值模拟的冰湖涌浪分析 ——以西藏聂拉木县嘉龙错为例

阿如汉¹, 涂杰楠², 刘红岩¹, 童立强², 郭兆成²

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 冰湖溃决洪水或泥石流(GLOF)是青藏高原主要灾害之一, 其形成的灾害链对人民的生命财产安全造成了严重的威胁, 其中冰崩导致的冰湖溃决是 GLOF 的主要灾害形式, 但由于其发生位置偏远、间隔时间长、随机性强, 导致实地观测资料缺乏, 冰崩入湖形成的涌浪机理和过程仍不清晰, 而涌浪的规模是 GLOF 造成下游灾害大小的最主要因素。为分析冰湖涌浪的产生、沿程传播过程和对冰碛坝的爬坡高度, 以西藏聂拉木县嘉龙错为例, 采用有限体积法, 基于流体计算软件 Fluent, 模拟了嘉龙错补给冰川发生冰崩导致冰湖涌浪的过程。结果表明: 数值模拟能较好地对涌浪的产生、规模、沿程传播和对岸爬坡过程进行再现, 涌浪初始高度随着冰湖水深、冰体入湖速度和冰体厚度的增加而增大, 涌浪高度增加趋势随着冰体入湖速度和冰湖水深的增加而增大, 随着冰体厚度的增加而减小。

关键词: 涌浪; 冰湖; 数值模拟; Fluent; 嘉龙错

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0837-09

0 引言

随着全球气候持续变暖, 喜马拉雅山区冰川退缩速度加快, 冰川消融增强, 导致冰湖面积逐渐扩大, 湖水蓄积量增多, 冰湖溃决风险加剧, 溃决产生的次生灾害链事件也因此增多^[1-3]。冰湖溃决洪水或泥石流是最主要的灾害链事件, 具有突发性强、影响范围广、破坏程度大等特点, 不仅危害着下游区人民的生命和财产安全, 对自然生态环境也会造成严重破坏^[4]。

我国的青藏高原地区分布着较多的冰碛湖, 其溃决后形成的洪水和泥石流在该地区造成了严重的危害。1954年康马县桑旺错冰湖溃决事件, 形成的特大洪水和泥石流造成约400人死亡, 大量房屋设施受损, 2万多人受灾^[5]。1964年和1981年发生的聂拉木县次仁玛错溃决事件, 溃决洪水冲毁了位于樟木口岸的中尼友谊桥及大量两岸建筑物, 使尼

泊尔境内的逊科西水电站严重受损, 并造成200余人死亡^[6-7]。2002年洛扎县得嘎错冰湖溃决洪水冲毁了大量的桥梁、农田及房屋建筑, 并造成10人死亡, 直接经济损失约3000万元^[8]。冰湖溃决诱因众多, 主要有冰/雪崩、冰滑坡、降水以及冰内湖水释放等引起的冰湖水位上升、冰碛坝内死冰消融、堤坝管涌扩大、地震等^[9], 其中因冰/雪崩或冰滑坡高速入湖产生的涌浪, 是冰湖溃决的直接触发因素。据统计, 20世纪以来我国西藏地区共发生过28次冰湖溃决事件, 其中60%的冰湖溃决是冰湖涌浪造成的^[10]。但绝大多数冰湖处于人迹罕至、气候恶劣、自然环境较差的高海拔地区, 难以正常进行地面调查工作, 导致地质研究调查资料较少; 受地质调查技术限制, 对冰湖溃决的研究目前仍限于溃决事件发生后才能开展, 难以在第一时间找出冰湖溃决隐患, 无法满足防灾减灾要求^[11]。因此, 开展针对冰湖涌浪的预测研究, 可为高原地区冰湖

收稿日期: 2018-01-22; 修订日期: 2018-04-26

基金项目: 中国地质调查局“青藏冰川变化与冰湖溃决灾害遥感综合调查”项目(DD20160342)资助

作者简介: 阿如汉(1995-), 男, 内蒙古通辽人, 蒙古族, 2016年在中国地质大学(北京)获学士学位, 现为在中国地质大学(北京)在读硕士研究生, 从事地质工程中的力学问题研究。E-mail: aruhan2016@163.com

通信作者: 刘红岩, E-mail: lhyan1204@126.com.

溃决灾害预防、避险和减灾提供科学依据,有重要的实践意义。

目前研究涌浪的手段较为成熟,有经验估算法、物理模型试验法和数值模拟法等。其中经验估算法为 Noda 法^[12]、美国土木工程学会(ASCE)推荐法^[13]、潘家铮法^[14]、水科院经验公式法等;物理模型试验主要为具体滑坡的水工模型及多组试验后得到的统计公式^[15];数值模拟法为有限单元法、有限差分法^[16-17]及无网格 SPH 法^[18]等。冰湖涌浪的研究可参考滑坡涌浪,目前主要以物理模型试验为主,例如 Balmforth 等^[19]利用室内水工模型来模拟涌浪导致冰湖溃决的过程,发现冰湖溃决与冰/雪崩大小、坝体形状、冰湖水位和坝体物质级配特征等相关,而现有数值模拟方法的研究主要集中在模拟冰湖溃决洪水的演进过程及其影响范围,对冰湖溃决前涌浪传播形态研究较为欠缺。随着计算机及数值理论的迅速发展,ANSYS Fluent 计算平台所提供的 VOF 模型能较好地处理自由面的大变形和自由面的拓扑结构发生变化等复杂情况,可应用于模拟流体飞溅、融合等复杂自由表面现象。本文以西藏聂拉木县嘉龙错冰湖为研究对象,采用数值模拟软件 Fluent 来模拟该冰湖溃决前涌浪高度及传播形态,结合潘家铮经验估算法来验证数值模拟结果,为该区域提出防治建议,以期减少冰湖溃决灾害带来的损失。

1 研究区概况

嘉龙错(28°12'45" N、85°50'53" E)位于西藏日喀则市聂拉木县冲堆普主沟沟内,距县城 20.6 km(图 1)。根据详细地面调查可知该湖为典型的冰川终碛湖,呈椭圆形,长 1 400 m,宽 580 m,面积约 0.61 km²;湖面海拔 4 410 m,湖深 2~56 m 不等,平均深在 36 m 左右,库容大约为 9.15 × 10⁶ m³(图 2)。冰湖北、东、南三侧为终碛坝,坝高 70~100 m,坝顶起伏达 20 m,顶宽最窄处仅 0.5 m,多呈锥状,底宽 35~60 m,背水坡度约为 45°,内侧近于垂直。终碛坝主要成分为松散含泥质碎块石,杂乱堆积,成分为中-深变质岩、片岩,少量花岗岩;北侧冰碛堤有溢流口,溢流口处实测出流量约为 0.3 m³ · s⁻¹。高分辨率遥感影像表明嘉龙错南侧发育现代冰川,面积约 4.67 km²,其中危险冰体面积约 0.45 km²,该冰川平均厚度为 38 m^[20],冰川表面发育大量冰裂隙(图 3),发生冰崩的可能性较高,对嘉龙错下游县城威胁较大。

嘉龙错流域新老构造运动强烈、岩体破碎、冰川侵蚀严重,区域内裂隙节理发育,残坡积物、崩塌滑坡和冰碛物分布普遍。流域属高原亚寒带半干旱气候区和山地亚热带湿润气候区交界处,气候较接近高原亚寒带半干旱气候区,年均温为 2.1 °C,冬寒夏凉;年平均降水量为 582.9 mm,降水集中

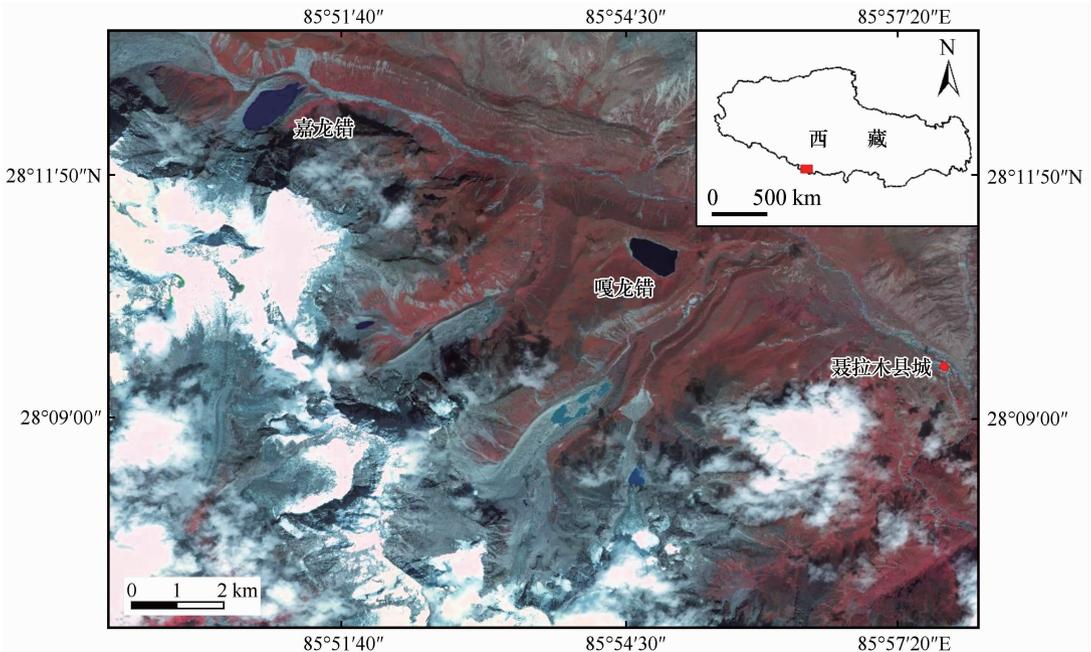


图 1 嘉龙错流域 GF-1 遥感影像(2015 年 9 月)

Fig. 1 Remote sensing image by GF-1 showing the Jialong Co basin (September 2015)

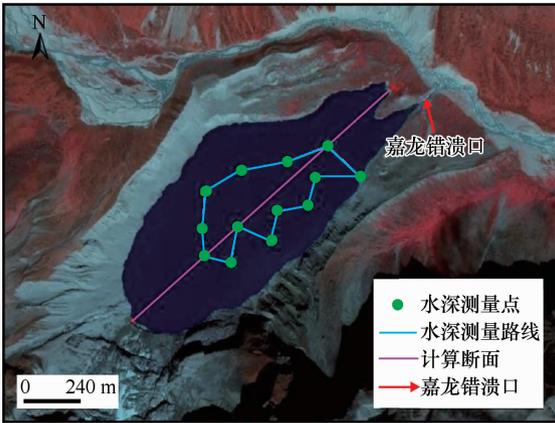


图2 嘉龙错水深测量点的分布

Fig. 2 Map showing the arrangement of water depth measurement in Jialong Co



图3 嘉龙错实景照片(涂杰楠 摄)

Fig. 3 Photo showing the glacier lake: Jialong Co (by TU Jianan)

在每年的6-8月,降雪期长达6个月以上。下游区域主要居民聚集区为聂拉木县城,还包括318国道、水电站及桥梁等基础设施,离县城不远处分布较多的农田和羊圈。受地震影响,冰湖下游区域大部分建筑物质量较差、易损性较高,冰湖一旦溃决将对下游区域人民生命财产安全造成严重威胁。

2 数值模拟方法及物理模型

Fluent 软件是一种基于完全非结构化网格的有限体积法发展起来的通用商业流体计算动力学软件包,可应用于从不可压到可压、从单相流到多相流等几乎所有与流体相关的领域,它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能,在流体相关领域有着广泛的应用。

2.1 数学模型与数值解法

2.1.1 控制方程

假设所涉及的流体为没有温度变化、二维非定

常不可压缩黏性瞬态,采用连续性方程和动量方程(N-S 方程)为基本控制方程。其方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为体密度; u 为流速矢量; t 为时间。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中: p 为静压; τ_{ij} 为应力张量; ρg_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力。

2.1.2 体积分方程

追踪自由液面的变化采用 VOF 法,该方法适用于不融合的两相流计算,基本原理是通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体容积比来模拟两种或三种不能混合的流体。其方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

式中: \vec{v} 为单元的平均速度向量; μ 为动力黏度; p 为单元体的平均压力; ρ 为体积分平均密度; \vec{g} 为重力加速度向量; \vec{F} 为作用于单元体上的外力向量。

在 VOF 方法中,引入了体积分 a_q 的概念,用于定义单元内第 q 相流体所占体积与单元体积的比值。 $a_q = 0$, 表示 q 相物质为空; $a_q = 1$, 表示 q 相物质充满; $0 < a_q < 1$, 表示该单元为交界面单元。

2.1.3 动网格模型和 UDF 编程

冰体入水过程视为刚体运动,采用动网格来实现。动网格模型可以用来模拟边界运动时其所处流场形状随时间变化的问题,对于动边界问题,Fluent 提供三种动网格更新方法来实现,即弹性光滑模型、局部网格重划法和动态层模型。

冰湖涌浪模型中最重要的问题是运动边界问题,Fluent 通过动网格 UDF 函数编程定义边界的运动方式、控速度与时间,并提供了三种 UDF 方法控制网格运动边界,分别为 DEFINE_CG_MOTION、DEFINE_GRID_MOTION 和 DEFINE_GEOM。其中 DEFINE_CG_MOTION 函数接口用于控制规律已知的刚体运动,可以将刚体重心的运动速度和角速度分别付给 vel 和 omega, Fluent 根据该值计算出边界下一步的位置从而实现动边界的控制,因此采取该方法控制边界节点的运动。

2.1.4 控制方程的数值解法

Fluent 中建立离散方程采用有限体积法(FVM),方程的扩散项采用中心差分格式离散,再进行数值计算,对流项按如下格式离散:压力方程

选用 Body Force Weighed 格式, 动量方程、湍动能方程和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式, 体积分数选用几何重构法, 时间差分采用全隐式格式, 离散方程的数值求解则采用压力-速度耦合的 PISO 算法。

2.2 计算模型

由于冰/雪崩产生冰湖涌浪的过程十分复杂, 本次模拟主要采用比例尺相似的二维平面几何简化模型进行模拟和分析。模拟参数与条件说明如下:

(1) 冰湖

以嘉龙错为原型, 依据西藏自治区环境监测总站实地测量资料, 在冰体滑落方向冰湖长轴中间位置截取剖面作为冰湖长度和深度的几何模型, 比例为 1:1。

(2) 冰川厚度

由于嘉龙错补给冰川位置较高, 难以实地测量, 冰川厚度以前人研究成果^[20] (38 m) 为参考设置为 40 m。

(3) 冰川长度

由于软件和模型的局限性, 冰体长度主要依据冰湖深度设置, 假设入水冰体为刚体, 因此当冰体到达湖底后其出露湖面长度大小对模拟结果无影响, 因此设置冰体长度为 80 m, 超过最大水深。

(4) 冰体滑落速度

由于缺乏冰体塌入冰湖的实际观测资料, 无法精确定冰体入水速度, 因此参考研究滑坡涌浪时常用的能量法^[21] 来计算出冰体入水速度, 取值为 $26.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 4 为计算几何模型示意图。

2.3 网格划分及初始化参数

计算区域采用非结构化三角形网格类型及分区划分网格方式, 在冰体附近适当加密网格, 大小为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 水槽区域网格大小为 $2 \text{ m} \times 1.75 \text{ m}$, 整个计算区域剖分为 78 360 个节点及 154 811 个单元。

模型中流场控制方程采用连续性方程和 N-S

方程, 自由表面处理采用 VOF 法, 初相设置为空气, 第二相设置为水, 湍流模型选择 RNG 模型, 自由表面重构为 Geo-Reconstruct 格式, 近壁区采用标准壁面函数法。模型运行环境考虑重力影响, 设空气温度为 $11.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 大气压强为 52.29 kPa , 空气密度值等于周围环境的流体密度, 为 $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 冰湖底部和斜坡均设为无滑移的固壁边界条件, 顶部设为压力出口边界条件, 冰体入水过程概化为刚体运动, 使用动网格模型, 运用 UDF 编程控制冰块入水速度。

3 结果与分析

3.1 初始涌浪形成及传播过程

模拟结果如图 5 所示, 冰体入水后, 由于高速挤压和冲击水面, 水面开始翻卷, 在 0.92 s 时水体表面形成一层斜向上运动的薄层舌状水波, 即水舌; 在 2.23 s 时冰体到达湖底停止运动, 但仍有更多的水体形成水舌向前运动并出现浪花, 同时在水舌尾部形成一个空腔; 在 4.87 s 时水舌向前移动至最高点 (67.4 m), 随后涌起浪花开始下降; 在 5.12 s 时水舌尾部空腔周围水体在内外水压差及重力作用下快速汇入空腔内, 波峰宽度加大。随着初始涌浪沿程传播距离的增加, 其传播速度也增大, 波浪出现频率差值, 有飞溅、破碎等现象, 并分散为一系列波继续向对岸传播。涌浪不同时刻自由面形态见图 5, 初始涌浪高度变化过程线见图 6。

3.2 对岸涌浪爬坡过程

为了研究涌浪在对岸的爬坡形态, 在计算区域冰湖右端点 $x = 1\,400 \text{ m}$ 处设置水位监测点, 涌浪在正对岸开始爬坡时间以此监测点水位开始变化的时刻为准。对岸涌浪形态随时间变化如图 7 所示, 在 60.60 s 时涌浪传播到正对岸, 该区域的水体在受到涌浪的持续推进和对岸岸壁的挤压作用下, 水面开始抬高; 之后迅速开始爬坡直至出现漫顶溢流现象; 此后在 87.14 s 时对岸坡面的水流开始迅速退水并不断地回到湖槽内, 使湖水水位抬高; 当涌浪

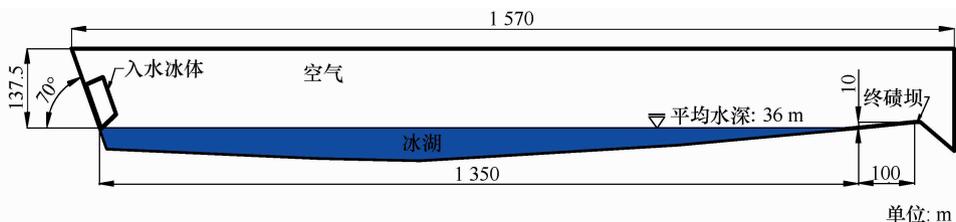
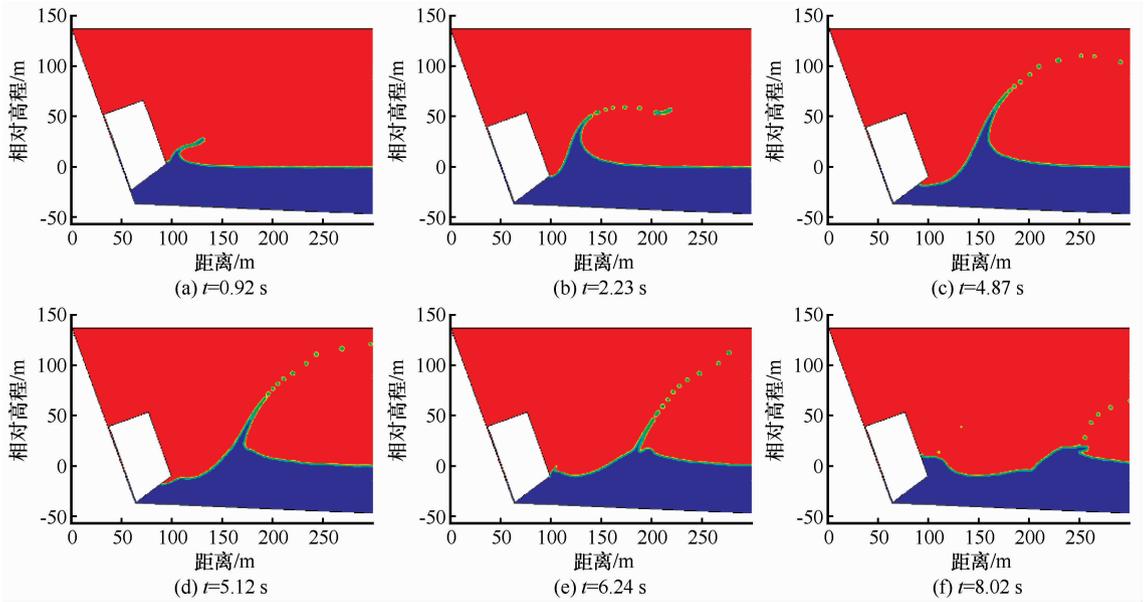


图 4 计算几何模型

Fig. 4 The computational geometric model



注：图中红色部分为空气，蓝色部分为水

图 5 不同时刻自由面形态

Fig. 5 The shapes of free-surface at different time (red part denoting air and the blue part denoting water)

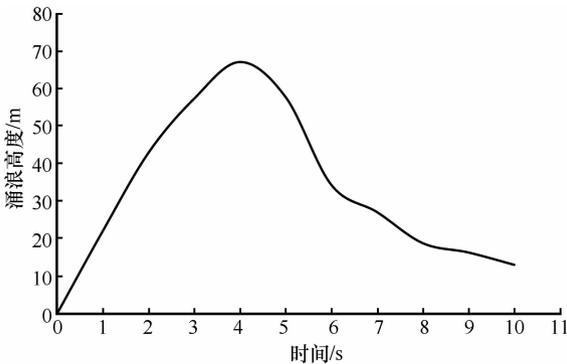


图 6 初始涌浪高度随时间的变化

Fig. 6 The initial surge height changing with time

跌落至最低点时，右岸次波峰传播到此水域，水面落差较大，湖水水位呈现左高、右低的现象，水位发生震荡，并在巨大落差作用下水体又开始向对岸传播。

3.3 与潘家铮法计算结果比较

采用修正潘家铮法^[22-23]以及汪洋等^[24]提出的涌浪爬坡高度公式计算了该冰体可能失稳后入水引起的涌浪高度，计算参数如下：冰体入水点至对岸距离选取为 $B = 1\ 350\ \text{m}$ ，坡面平均宽度 $L = 400\ \text{m}$ ，冰湖平均水深 $h = 36\ \text{m}$ ，冰体平均厚度 $\lambda = 40\ \text{m}$ ， $m(90) = 0.696$ ，冰体入水速度 $v = 26.1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经计算冰体入水点初始涌浪高度为 $53.30\ \text{m}$ ，传播至对岸的最高涌浪为 $13.60\ \text{m}$ ，对岸最大爬坡高度为 $9.59\ \text{m}$ 。为了分析涌浪的传播规律又计算了下游

游沿岸 500、800 和 1 200 m 位置的涌浪高度，其结果见表 1。

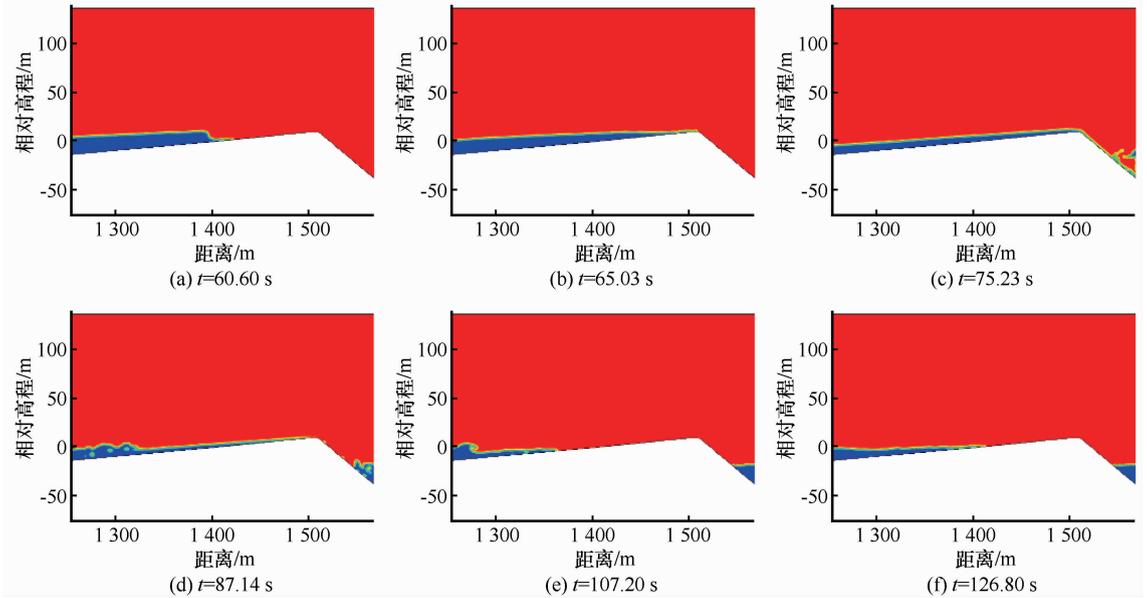
由表 1 可知，在入水点及正对岸处，数值模拟计算涌浪高度都大于潘家铮法估算结果，这是由于数值模拟可以反映出冰湖水体之间的复杂作用和涌浪的叠加效果，其过程均伴随着巨大水花。潘家铮估算法是基于库水单向流分析水库涌浪问题，无法做到数值模拟的精度，因此计算高度比数值模拟计算结果低。而计算下游区距入水点 500、800 和 1 200 m 处的浪高及对岸的涌浪爬坡高度时，两种方法的计算误差很小，冰湖涌浪沿程传播衰减过程也基本相同，可确定数值模拟对分析冰湖涌浪沿程传播形态具有一定的参考价值。

3.4 不同工况对涌浪规模的影响

3.4.1 冰湖深度

由于强降雨及气温的快速回升^[25]，冰川强烈消融，冰湖外来水源增多，势必会导致冰湖水位的上涨，而终碛堤溢流口处的湖水流出，会使冰湖水位下降。本文考虑了三种不同水深情况，研究涌浪传播的形态及高度，其初始涌浪高度如图 8 所示。

从图 8 可知，冰体所激起的涌浪高度与冰湖水深成正比关系。在现状坝体高度下，随着冰湖水位的上涨，初始涌浪及对岸处涌浪高度增大，从而更容易形成漫顶溢流，进一步加快坝体溃决。以此为根据，建议相关部门定期监测冰湖水位，给出冰湖溃决可能性，以最大的限度减轻冰湖溃决灾害。三



注：图中红色部分为空气，蓝色部分为水
图 7 对岸涌浪形态随时间的变化

Fig. 7 Variation of surge shape with time in the opposite bank (red part denoting air and the blue part denoting water)

表 1 涌浪高度计算对比

Table 1 Comparison of the calculated surge heights

计算位置	潘家铮法计算值/m	数值模拟计算值/m	误差/%
入水点	53.30	67.40	20.9
对岸附近	13.60	12.89	5.2
距落水点 500 m	12.22	11.60	5.0
距落水点 800 m	9.20	8.72	5.0
距落水点 1 200 m	7.82	7.19	8.1
对岸爬坡	9.59	11.08	13.4

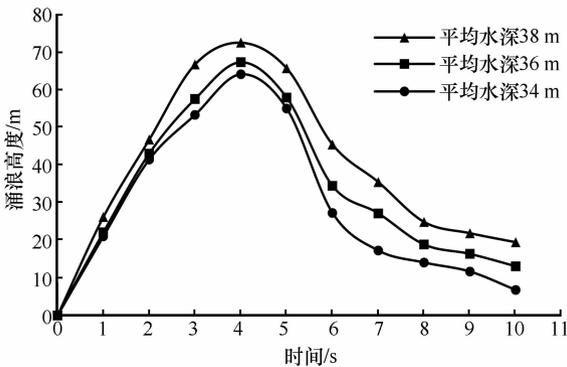


图 8 不同水深情况下的初始涌浪高度

Fig. 8 The initial surge heights at different lake water depths

种工况对比表明，当冰湖水深加深，其初始涌浪高度从 64.2 m 增加到 67.4 m，最终达到 72.6 m，增加的单位深度对涌浪高度变化的影响[即 $(H_2 - H_1)/(h_2 - h_1)$]， H 为涌浪高度， h 为冰湖水深]从

1.6 m 增加到 2.1 m，表明初始涌浪高度随着冰湖水深的增加呈加速增高趋势。

3.4.2 冰体入水速度

为了研究冰体入水速度对涌浪形态的影响，取三种不同的速度，分别为 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $26.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $32.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由图 9 可见，在同一水深情况下，冰体入水速度越大，水面在短时间内被抬升得越高，形成的初始涌浪高度会增大，沿程传播速度也会加快。因此，高速传播的涌浪很可能会加快对坝体的冲蚀及漫顶，缩短冰湖溃决过程持续时间。三种工况对比分析表明，当冰体入水速度增大，其初始涌浪高度从 54.9 m 增加到 67.4 m，最终达到 91.9 m，冰体入水的单位增速对涌浪高度变化的影响[即 $(H_2 - H_1)/(v_2 - v_1)$]， H 为涌浪高度， v 为冰体入水速度]从 2.08 m 增加到 3.08 m，表明初始涌浪高度随着冰体入水速度的增加呈加速增高趋势。

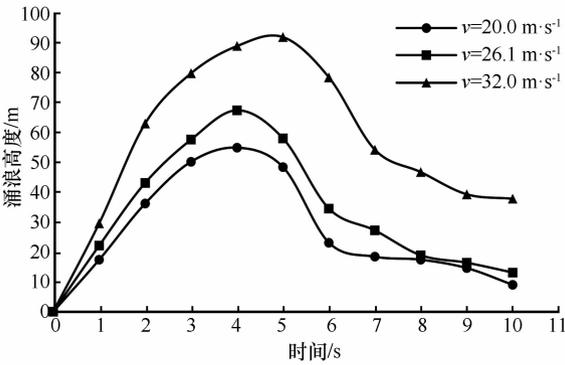


图9 不同入水速度下的初始涌浪高度
Fig.9 The initial surge heights at different collapsing velocities

3.4.3 入湖冰体体积

王欣等^[26]在研究冰碛湖溃决灾害评价方法时认为,崩塌的冰积大小也是影响涌浪特征的一项重要因素。本文以冰体厚度为变量选取三种不同的冰体体积分析涌浪特征的改变,平均厚度分别为40 m、30 m和20 m,数值模拟结果如图10所示。在同一水深条件下,入水速度相同时,小体积冰体能较快达到最高涌浪点,随着入水冰块体积的增大,初始涌浪高度及波峰宽度都会增大。可见,冰湖涌浪规模与入水冰体体积呈正相关,而首浪规模越大,冲蚀能力越强,对冰碛湖溃决的贡献就越多,造成的灾害程度也越大。三种工况对比分析表明,当入湖冰体体积增加,其初始涌浪高度从40.9 m增加到57.4 m,最终达到67.4 m,增加的冰体单位厚度对涌浪高度变化的影响[即 $(H_2 - H_1)/(\lambda_2 - \lambda_1)$, H 为涌浪高度, λ 为冰体平均厚度]从1.65 m减小到1.33 m,表明初始涌浪高度的增加随着入湖冰体厚度的增加呈减小趋势。

通过不同工况涌浪高度分别对相应冰湖水深、

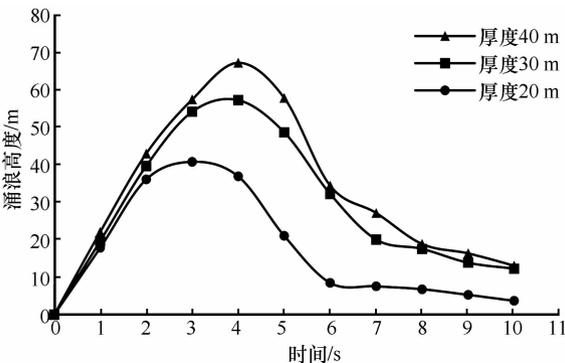


图10 不同冰体体积下的初始涌浪高度
Fig.10 The initial surge heights at different collapsing ice block thicknesses

入水速度和冰体厚度进行比值,得到各要素对于涌浪初始高度影响的变化规律(图11)。结果表明,冰体入水速度对冰湖涌浪高度的影响最大,冰湖水深和冰体厚度影响较相近,但单位要素对涌浪初始高度的影响随着入水速度和冰湖深度的增加呈增加趋势,随着冰体厚度的增加呈减小趋势。

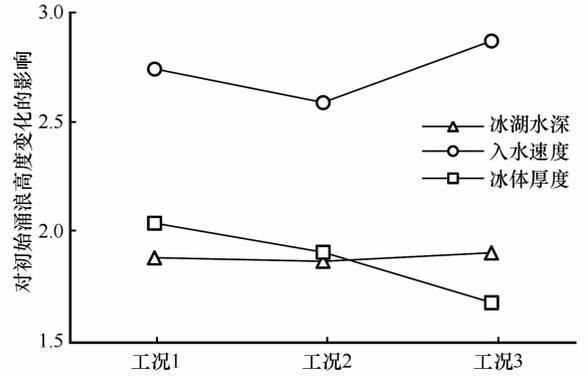


图11 不同要素对初始涌浪高度变化的影响
Fig.11 The effects of lake water depth, collapsing velocity and collapsing ice block thickness on the initial surge height under different working conditions

4 结论

基于数值模拟软件 Fluent,以西藏聂拉木县嘉龙错冰湖为例,模拟了冰滑坡或冰崩入水引起的冰湖涌浪传播形态。结论如下:

(1) 冰崩发生后,冰体高速冲击湖面,形成较高的初始涌浪并伴随大量水花,在4.87 s时初始涌浪达到最高点,距湖面67.4 m,随后涌浪沿程传播明显衰减,并在60.6 s时涌浪到达终碛坝,爬坡高度达10.9 m,大量湖水漫顶过坝。

(2) 初始涌浪产生后,由于冰湖湖面较小,在其抵达四周湖岸后反向传播会产生叠加效应,而次级涌浪的连续反复推进亦是侵蚀终碛坝坝体的另一重要因素,进一步加剧冰湖溃决的风险。

(3) 冰湖涌浪传播过程复杂,影响因素众多,本文采用数值模拟方法分析了冰湖水深、冰体入水速度和入湖冰体体积3个因素对涌浪传播形态的影响。结果表明,冰湖水深的增加、冰体入湖速度的增大和冰体厚度的增加均会导致更高的涌浪和更快的传播速度,加快终碛壅的溃决。但涌浪初始高度的增加随着冰湖水深和冰体入水速度的增加呈增大趋势,而随着冰体厚度的增加呈减小趋势。

根据数值模拟结果,针对预防嘉龙错冰湖溃决灾害,建议加强冰湖溃决的机理和预测预报研究;

定期监测冰湖水位,采用排水工程降低冰湖水位以减少湖水对坝体的冲蚀,增加坡体的稳定;检查并修复已发生管涌的坝体。

致谢:冰湖水深数据及现场资料的获取得到西藏自治区地质环境监测总站周成灿总工、赵振远高工、彭欢和王定武工程师等的全力支持,对他们辛勤艰苦的付出表示诚挚的谢意。

参考文献 (References):

- [1] Qin Dahe. Assessment on the environmental evolution of western China: vol 1[M]. Beijing: Science Press, 2002: 50-51. [秦大河. 中国西部环境演变评估: 第一卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 50-51.]
- [2] Cui Peng, Chen Rong, Xiang Lingzhi, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(2): 103-109. [崔鹏, 陈蓉, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 103-109.]
- [3] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Bao Weijia, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 24-34. [吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980-2015年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 24-34.]
- [4] Wang Zhoufeng, Zhang Tingshan, Wang Chengwu. Prediction model and its application for glacial lake outburst in the Himalayas area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 388-394. [汪宙峰, 张廷山, 王成武. 西藏喜马拉雅山地区冰湖溃决的预测模型及其应用研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 388-394.]
- [5] Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Tibet Himalayas[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(3): 343-352. [徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰碛湖及其溃决特征[J]. *地理学报*, 1989, 44(3): 343-352.]
- [6] Yamada T. Glacier lakes and outburst floods in the Nepal Himalaya[C]// *Snow and glacier hydrology*. Wallingford, UK: IAHS, 1993: 319-330.
- [7] Yang Zonghui. Recent status and treatment of debris flow in Tibet[C]// *Proceedings of Experience Exchange Meeting of Debris Flow Treatment in China*. Chongqing: Chongqing Branch of Scientific and Technical Documentation Press, 1983: 12-15. [杨宗辉. 西藏境内泥石流活动近况及整治[C]//*全国泥石流防治经验交流会议论文集*. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 12-15.]
- [8] Tong Liqiang, Qi Shengwen, An Guoying, et al. Investigation and monitoring of major geological hazards in Himalayas[M]. Beijing: Science Press, 2013. [童立强, 祁生文, 安国英, 等. 喜马拉雅山地区重大地质灾害遥感调查研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [9] Wang Xin, Liu Shiyin. An overview of researches on moraine-dammed lake outburst flood hazards[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 626-635. [王欣, 刘时银. 冰碛湖溃决灾害研究进展[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 626-635.]
- [10] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1377-1390. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1377-1390.]
- [11] Liu Chunling, Tong Liqiang, Qi Shengwen, et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3): 110-115. [刘春玲, 童立强, 祁生文, 等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 110-115.]
- [12] Noda E. Water waves generated by landslides[J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1970, 96(4): 835-855.
- [13] Wang Shimei, Chen Yong. Prediction on Chenjia compound landslide surge of Liyutang Reservoir in Chongqing City[J]. *Yangtze River*, 2006, 37(8): 98-100. [王世梅, 陈勇. 重庆市鲤鱼塘水库陈家大院滑坡涌浪预测[J]. *人民长江*, 2006, 37(8): 98-100.]
- [14] Pan Jiazheng. Stability of construction against sliding and landslide analysis[M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980: 133-151. [潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980: 133-151.]
- [15] Xiao Lili, Yin Kunlong, Wang Jiajia, et al. Impulse wave generated by reservoir landslides based on physical model experiments[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 45(5): 1618-1626. [肖莉莉, 殷坤龙, 王佳佳, 等. 基于物理模拟试验的库岸滑坡冲击涌浪[J]. *中南大学学报*, 2014, 45(5): 1618-1626.]
- [16] Song Xinyuan, Xing Aiguo, Chen Longzhu. Numerical simulation of two-dimensional water waves due to landslide based on FLUENT[J]. *Journal of Hydrology and Engineering Geology*, 2009(3): 90-94. [宋新远, 邢爱国, 陈龙珠. 基于 FLUENT 的二维滑坡涌浪数值模拟[J]. *水文地质工程地质*, 2009(3): 90-94.]
- [17] Qiu Xin, Xing Aiguo, Wang Guozhang. Numerical simulation analysis of water waves due to landslide based on FLUENT[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 26-31. [邱昕, 邢爱国, 王国章. 基于 FLUENT 数值模拟的滑坡涌浪分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 26-31.]
- [18] Du Xiaotao, Wu Wei, Gong Kai, et al. Two dimensional SPH simulation of water waves generated by underwater landslide[J]. *Journal of Hydrodynamics: Series A*, 2006, 21(5): 579-586. [杜小涛, 吴卫, 龚凯, 等. 二维滑坡涌浪的 SPH 方法数值模拟[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2006, 21(5): 581-586.]
- [19] Balmforth N J, von Hardenberg J, Provenzale A, et al. Dam breaking by wave-induced erosional incision[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1) [2018-04-16]. <https://doi.org/10.1029/2007JF000756>.
- [20] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong, et al. Risk assessment of glacial lake outburst in the Poqu River basin of Tibet Autonomous Region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 509-516. [陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 喜马拉雅山中段波曲流域近期冰湖溃决危险性分析与评估[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 509-516.]
- [21] Liu Yunpeng, Wu Jiahao, Li Hui. Surge prediction study of reservoir bank landslide near a hydropower dam[J]. *Advances in*

- Geosciences, 2015(5): 114 – 129. [刘云鹏, 吴佳壕, 李辉. 某水电站近坝库岸滑坡涌浪预测研究[J]. 地球科学前沿, 2015(5): 114 – 129.]
- [22] Ren Xingwei, Tang Yiqun, Dai Yunxia, et al. Improved method for calculating landslide initial surge height[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1116 – 1119. [任兴伟, 唐益群, 代云霞, 等. 滑坡初始涌浪高度计算方法的改进及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1116 – 1119.]
- [23] Dai Yunxia, Yin Kunlong, Wang Yang. Discussion on method of landslide velocity calculation and surge prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 407 – 411. [代云霞, 殷坤龙, 汪洋. 滑坡速度计算及涌浪预测方法探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 407 – 411.]
- [24] Wang Yang, Yin Kunlong. Research on propagation and surge runoff triggered by landslide in reservoir[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1031 – 1034. [汪洋, 殷坤龙. 水库库岸滑坡涌浪的传播与爬高研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1031 – 1034.]
- [25] Chen Hongju, Yang Jianping, Tan Chunping. Responsivity of glacier to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 16 – 23. [陈虹举, 杨建平, 谭春萍. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 16 – 23.]
- [26] Wang Xin, Liu Shiyin, Ding Yongjian. Study on evaluation method and application of moraine dammed lake outburst disaster in Himalaya Range, China[M]. Beijing: Science Press, 2016. [王欣, 刘时银, 丁永建. 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]

Numerical simulation of the glacier lake surge based on Fluent: a case study of Jialong Co, Nyalam County, Tibet

Aruhan¹, TU Jienan², LIU Hongyan¹, TONG Liqiang², GUO Zhaocheng²

(1. College of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Glacier lake outburst floods (GLOF) is one of the major disasters in the Tibetan Plateau, which results in a serious threat to people's life and property. The size of the surge caused by glacier collapse is the most important factor of GLOF. However, due to its remote location, long interval time and strong randomness, there is no in-situ observation till now. So far, the research about the size of the surge caused by ice collapse is fruitless till now. By using the finite volume method and CFD software Fluent, the surge process of Jialong Co when the feeding glacier collapsed has been simulated. Process of the initial surge has been analyzed, as well as, the surge wave propagation along the path and the height of the surge at the opposite bank. The results have been compared with the calculation given by PAN Jiazheng's method. Finally, it was found that the numerical simulation could well reproduce the surge wave formation, scale, propagation and slope climbing, so it is believed that the simulation would provide new ideas for the risk assessment and the study of GLOF.

Key words: surge; glacier lake; numerical simulation; Fluent; Jialong Co

(本文编辑: 武俊杰)