

引用格式: 郭坤, 姜元俊, 朱元甲, 赵斌滨, 韦粤语. 湿雪雪崩冲击刚性挡墙的实验研究[J]. 山地学报, 2026, 44(1): 63-73.  
GUO Kun, JIANG Yuanjun, ZHU Yuanjia, ZHAO Binbin, WEI Yueyu. Experimental study on the impact of wet snow avalanche on rigid retaining walls [J]. Mountain Research, 2026, 44(1): 63-73.

## 湿雪雪崩冲击刚性挡墙的实验研究

郭坤<sup>1,2</sup>, 姜元俊<sup>1\*</sup>, 朱元甲<sup>1,2</sup>, 赵斌滨<sup>3</sup>, 韦粤语<sup>4</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室, 成都 610213;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家电网 国网电力工程研究院有限公司, 北京 100069;  
4. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 湿雪雪崩是中国藏东南地区常见的自然灾害, 严重威胁区域经济社会安全。前期研究多探讨干雪雪崩对结构物的冲击作用, 针对湿雪雪崩的研究相对匮乏。本文在西藏藏东南嘎隆拉地区开展了现场模型实验, 揭示了湿雪因黏聚力作用而产生的“分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积”冲击模型。基于该现场实验数据, 研究明确了该模型冲击阶段的判别条件以及堆积高度时程计算公式, 并验证当折减系数设定为 0.7, 计算结果与实验数据高度吻合; 进一步提出了一种基于堆积高度的冲击力学模型, 与 Ashwood 模型和 Tan 模型对比表明, 本文模型计算结果与实验数据更为一致, 而后两者计算值明显偏低; 定量分析了冲击过程中各分力在总冲击力中的占比演变, 阐明了动压力主导向静压力主导的转变机制。研究成果可为湿雪雪崩防灾减灾设计提供重要的参考依据。

**关键词:** 湿雪雪崩; 刚性挡墙; 冲击力; 堆积高度; 现场实验

**中图分类号:** P426.63+6

**文献标志码:** A

受全球变暖影响, 极端降雪与升温频繁交替, 湿雪雪崩发生率显著上升<sup>[1-2]</sup>。在中国藏东南区域, 雪崩是最具破坏性的地质灾害之一, 对道路、隧道、输电线路和水电设施构成严重威胁。拦挡结构是雪崩灾防治的常用工程措施, 深入研究雪崩与拦挡结构的相互作用机理, 可为防灾设施的设计优化提供科学依据。

关于雪崩-拦挡结构相互作用的前期研究多关注干雪雪崩, 重点探讨影响雪崩冲击力的因素以及其在支挡结构前缘的堆积效应。研究发现, 雪崩流冲击力主要受流速和流深控制<sup>[3]</sup>, 其冲击力动态峰值与流体动压近似成正比关系<sup>[4-5]</sup>。不同类型拦挡结构(刚性挡墙、柔性拦网、土石导流坝等)前形成的堆积区会改变后续来流的碰撞形态, 进而调控冲

击力峰值<sup>[6-8]</sup>。结构前缘堆积特征主要受地形条件<sup>[9]</sup>、雪崩流动力学参数及规模<sup>[10]</sup>、拦挡结构参数的影响<sup>[11-12]</sup>, 可用堆积高度与长度表征。堆积高度在一定范围内近似线性增长, 而堆积长度一般与堆积高度成正比<sup>[13]</sup>。

评估雪崩对防护结构的冲击力是雪崩防治研究的热点。Faug<sup>[14]</sup>等提出了一种基于深度平均的动力学计算模型, 但仅适用于越过障碍物的雪崩稳态流。Jiang<sup>[15-17]</sup>等采用模型实验研究颗粒性质对冲击力的影响, 提出了干颗粒流对刚性挡墙冲击力的计算模型, 但没有考虑颗粒流的黏聚特性。Yu<sup>[18]</sup>和 Li<sup>[19]</sup>等发现, 颗粒流冲击刚性结构的法向力可分解为来流动量传递的动冲击力和堆积死区形成后的准静压力, 并随过程由动载主导转为静载主导。

收稿日期(Received date): 2026-01-14; 改回日期(Accepted date): 2026-02-24

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42172320)。[National Natural Science Foundation of China (42172320)]

作者简介(Biography): 郭坤(2000-), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程与地质灾害防治。[GUO Kun (2000-), male, born in Kaifeng, Henan province, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering and geological disaster prevention] E-mail: guokun@imde.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 姜元俊(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 岩土工程与地质灾害防治。[JIANG Yuanjun (1982-), male, Ph. D., professor, research on geotechnical engineering and geological disaster prevention] E-mail: yuanjun.jiang.civil@gmail.com

Ashwood<sup>[20]</sup>等针对刚性与柔性屏障,利用室内模型实验定量分析了冲击力,并采用主动侧向土压力来计算静压力。Tan<sup>[21]</sup>等分析了黏性流与柔性网的作用过程,提出了考虑堆积区与流动层之间的摩擦耗能效应的力学计算模型。

本文基于嘎隆拉现场滑槽实验,分析堆积高度演化与挡墙冲击荷载之间的数量关系。通过提取分析湿雪雪崩冲击刚性挡墙结构时的流速、流深、堆积高度发育规律、冲击力的时间历程等实验结果,确定了不同的冲击阶段,依据冲击阶段建立并验证了冲击力学模型。本文的理论分析可为湿雪雪崩防灾减灾设计提供重要的参考依据。

## 1 研究区域和方法

嘎隆拉雪山位于西藏自治区林芝市墨脱县与波密县交界地带,是岗日嘎布山脉的西端段,平均海拔4800 m。受南面印度洋暖气流和北面青藏高原高寒冷气的交锋带影响,嘎隆拉地区发育代冰川地貌,常年积雪平均厚5~6 m。

本研究选择在嘎隆拉区域采用灾害点附近积雪开展现场滑槽实验,样点海拔约3900 m,雪崩孕育条件与林芝地区典型雪崩灾害环境基本一致。实验于4—5月进行,期间环境温度为0℃~10℃,与实际湿雪雪崩发生的气温条件相符。

本实验旨在揭示湿雪雪崩冲击刚性挡墙的作用机制,因此实验设计未针对具体雪崩案例进行严格几何缩尺,主要依据弗劳德数相似准则确定滑槽的几何形态及倾角、长度和宽度等参数,以保证实验模型与实际湿雪雪崩在动力学行为上的可比性。实验记录湿雪雪崩冲击挡墙的完整过程,并测量冲击力时程。基于视频资料进一步提取动力学参数及堆积形态演化特征,结合冲击力测量结果开展理论分析。

### 1.1 模型实验设置

湿雪雪崩通常表现出高密度、高含水率与强黏聚性的特征,其动力学行为受温度影响显著<sup>[22-24]</sup>。结合实验需求与场地条件,对湿雪雪崩冲击刚性挡墙的装置进行详细设计,实验装置主要包括滑槽装置以及数据测量与采集装置。

#### (1) 滑槽装置

本研究在嘎隆拉区域构建现场滑槽实验系统,主要包括滑槽主体、挡墙结构及数据采集系统,如图

1所示。滑槽由倾斜段与水平段组成,倾斜段长6 m、坡角38°,水平段长3.6 m,槽体宽0.9 m、高0.5 m。一侧侧壁采用木质板材,另一侧为亚克力板,以观测雪体运动过程。物源区位于滑槽上部,设置可控挡门实现雪体的同步释放,挡门底部加高以减少对雪流的扰动。滑槽的坡角与长度直接影响碎屑流的流速与冲击力,基于前人研究<sup>[25-26]</sup>,本实验所采用的参数能够确保产生足够的冲击效应。

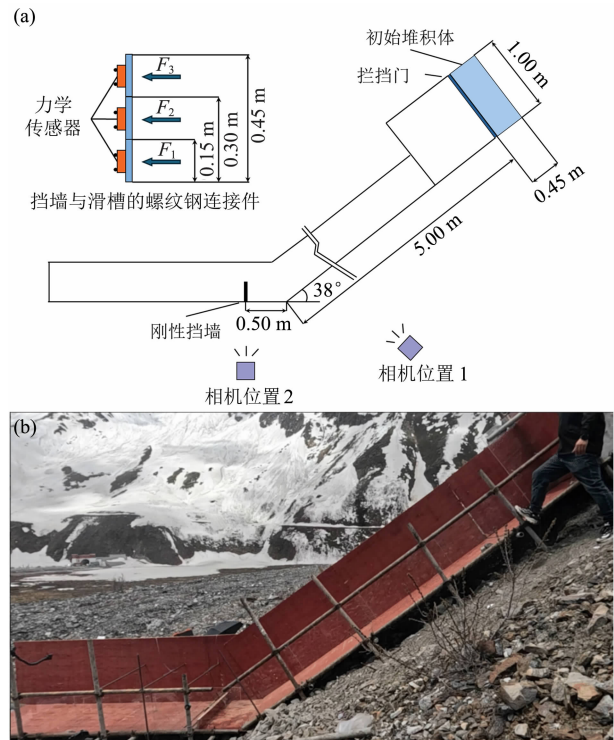


图1 实验装置图:(a)示意图;(b)现场滑槽装置

Fig.1 Experimental setup:

(a) schematic layout; (b) in-situ chute experiment setup

#### (2) 数据测量与采集装置

挡墙设于滑槽水平段末端,结构由尺寸为0.90 m×0.15 m×0.032 m的木板拼接而成,总宽度与槽体一致。挡墙背面布置三轴力学传感器,从下至上测得的力分别为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ,叠加获得总冲击力 $F_{total}$ 。所有传感器信号由东华测试DH3820N动态信号采集系统同步记录,采样频率为2000 Hz,并采用移动平均滤波抑制高频噪声。

视频监测系统由两台GoPro Hero 13相机组成。相机1位于滑槽远端,用于记录雪崩整体运动过程;相机2布置于近场侧方,捕捉雪体冲击挡墙的局部细节。基于获取的图像序列,利用PIVlab软件提取

流速、流深及堆积高度数据,为冲击过程分析提供依据。

### 1.2 实验材料

本实验采用来自雪崩发生区天然积雪作为物源材料。按照图 2 所示方案,在雪层剖面上使用内径 46 mm、长 240 mm 的聚乙烯管垂直取样,每间隔 10 cm 采集一次,共计五组,测得雪体平均密度为  $496.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (表 1)。参考 Naaim<sup>[27]</sup> 等的研究,当雪体密度约为  $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时,内摩擦系数可取 0.4。雪体堆积角按照 Eidevg<sup>[28]</sup> 的方法测定。雪体与底板之间的摩擦角通过视频图像分析确定,约为  $23.8^\circ$ 。

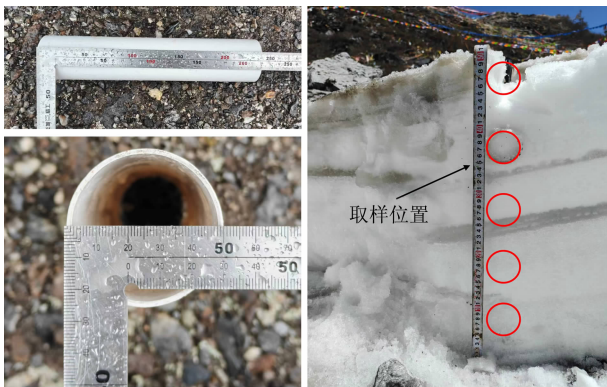


图 2 密度测量取样

Fig. 2 Sampling procedure for density measurement

表 1 积雪密度测量值

Tab. 1 Snow density measurement value

编号	净重/g	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
1	302.80	482.38
2	306.40	491.40
3	330.10	550.82
4	331.50	554.19
5	271.90	404.91

### 1.3 实验方案

本研究共设置四种工况,包括无阻挡结构对照工况及三种不同挡墙高度工况(表 2)。其中,无阻挡结构工况用于获取湿雪雪崩自由运动过程中的流速与流深参数。每组工况均重复开展 3 次实验,以各重复实验结果的均值作为该工况响应变量的最终取值,共计完成 12 组有效实验。初始状态下,湿雪在挡门后方堆积成  $0.45 \text{ m} \times 0.90 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$  的矩

形雪体。每次释放时,通过抬起挡杆使挡门与雪体在重力作用下同步运动,以确保各次雪崩初始运动条件一致。

表 2 实验工况

Tab. 2 Experimental conditions

实验组次	结构	结构高度/m
1	无阻挡结构	
2		0.15
3	挡墙	0.30
4		0.45

## 2 实验结果及分析

### 2.1 “分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积”冲击模型

采用相机以 270 fps 帧率记录湿雪雪崩运动过程。图 3 显示了挡墙高度为 0.30 m 工况下湿雪雪崩冲击挡墙的三个冲击阶段。与干雪雪崩相比,湿雪雪崩在挡墙作用后形成的堆积区表现出不同的演化特征。

(1) 分层直冲阶段(图 3a):在初始冲击阶段,湿雪雪崩直接冲击挡墙,并在墙前形成明显的三角

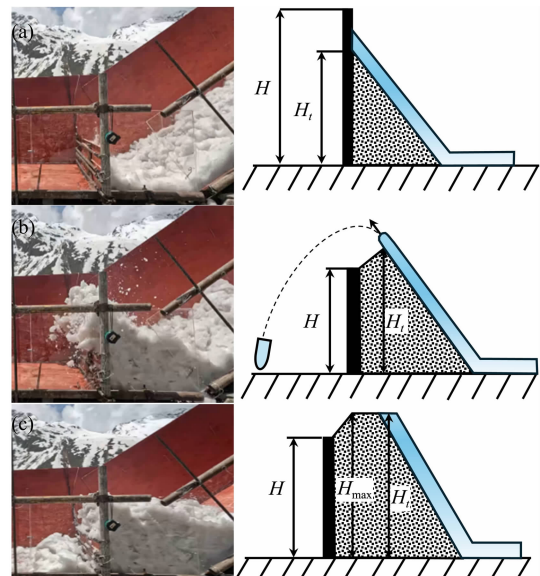


图 3 湿雪冲击的三个阶段:

(a) 分层直冲( $H_t < H$ ); (b) 跃顶高抛( $H \leq H_t < H_{max}$ );

(c) 超顶堆积( $H_t = H_{max}$ )

Fig. 3 Three stages of wet-snow impact: (a) stratified direct impact ( $H_t < H$ ); (b) over-top projecting ( $H \leq H_t < H_{max}$ );

(c) super-top accumulation ( $H_t = H_{max}$ )

(c) super-top accumulation ( $H_t = H_{max}$ )

形堆积区。部分雪流在与结构面接触后发生反向运动,形成向上及向后的射流,此阶段堆积高度  $H_t$  小于挡墙高度  $H$ , 定义为分层直冲阶段。

(2) 跃顶高抛阶段(图 3b):随着后续来流持续输入,堆积区高度逐渐增加。当  $H_t$  超过  $H$  时,后续雪崩流沿堆积斜面向上运动并发生溢流,雪崩流抛射点高于结构顶部,定义为跃顶高抛阶段。

(3) 超顶堆积阶段(图 3c):当堆积高度达到峰值  $H_{max}$  时,后续雪崩流能量显著衰减,溢流逐渐终止。雪崩流不再直接冲击挡墙,并形成稳定的后方堆积区。此后堆积区高度基本稳定,沿坡向长度仍缓慢增长,最终形成超顶稳定堆积区,定义为超顶堆积阶段。

## 2.2 湿雪雪崩运动参数及堆积高度发育特征

根据无拦挡结构工况下湿雪雪崩流经挡墙位置的流速和流深时程曲线(图 4a、4b),可得:(1)雪崩

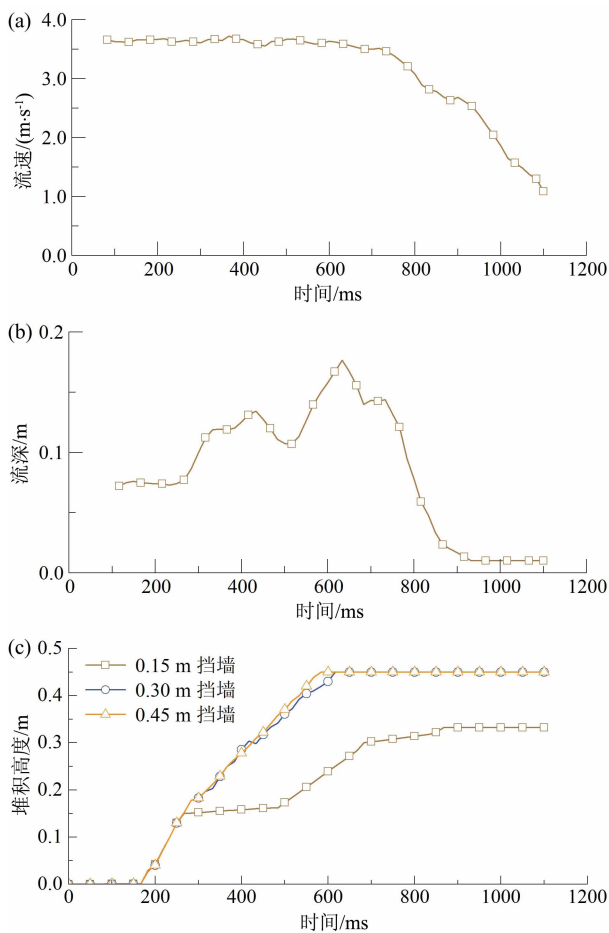


图 4 湿雪雪崩运动及堆积参数的时程曲线:

(a) 流速;(b) 流深;(c) 堆积高度

Fig. 4 Time histories of wet-snow avalanche movement and deposition parameters: (a) flow velocity; (b) flow depth; (c) deposition height

前缘与中段流速相对稳定,尾部受基底摩擦影响显著减小;(2)流深呈现前缘较小、中段最大、尾部逐渐减小的变化特征。湿雪雪崩冲击过程中,弗劳德数为 2~5。三种挡墙高度工况下堆积高度随时间的变化曲线(图 4c)表明,在分层直冲阶段,堆积高度近似线性增长;进入跃顶高抛阶段后,其增长速率有所减缓;随着堆积区进一步发育,增长速率再次增大。

在相同雪体规模与动力学参数条件下,湿雪雪崩在冲击较高挡墙时,堆积高度更易快速达到峰值;在较低挡墙条件下,由于结构拦阻与耗能作用相对较弱,堆积高度增长过程中会出现平台期,表现为阶段性发育特征。

## 2.3 法向力演化特征

以 0.30 m 挡墙工况为例,法向力与堆积高度的时程变化表明:(1)雪崩流接触挡墙后,法向力在极短时间内迅速达到峰值,随后逐渐衰减并趋于稳定(图 5a);(2)法向力增长阶段对应雪崩流对结构的分层直冲过程,此时总荷载以动压力为主,其峰值出现在分层直冲向跃顶高抛过渡阶段,之后法向力逐步衰减(图 5b);(3)冲击结束后,法向力残余值相较于峰值下降幅度约 12%,说明由堆积高度决定的静压力对结构受力的贡献不可忽略。

## 3 冲击力学模型划分与建立

### 3.1 现有冲击力学模型介绍

早期的研究及工程设计中,常借鉴流体静压与动压理论,将雪崩冲击简化为流体作用于障碍物的静压力与动压力之和。Ashwood<sup>[20]</sup> 等认为碎屑流冲击障碍物时的总法向力  $F_n$  包含动压力  $F_d$  和静压力  $F_s$  两部分,并基于动量守恒推导作用在拦挡结构上的动压力。计算公式如下:

$$F_n = F_d + F_s \quad (1)$$

$$F_d = k_d \rho b v_t^2 h_t \quad (2)$$

式中,  $k_d$  为动压力系数,取值为 1;  $\rho$  为湿雪流密度;  $b$  为挡墙宽度;  $v_t$  为  $t$  时刻流速;  $h_t$  为  $t$  时刻流深。

$F_s$  按照被动土压力方法计算,在工程设计中,库伦土压力理论是最常用的土压力计算方法之一,计算公式如下:

$$F_s = 0.5 k_p b \rho g H_t^2 \quad (3)$$

式中,  $k_p$  为土压力系数。

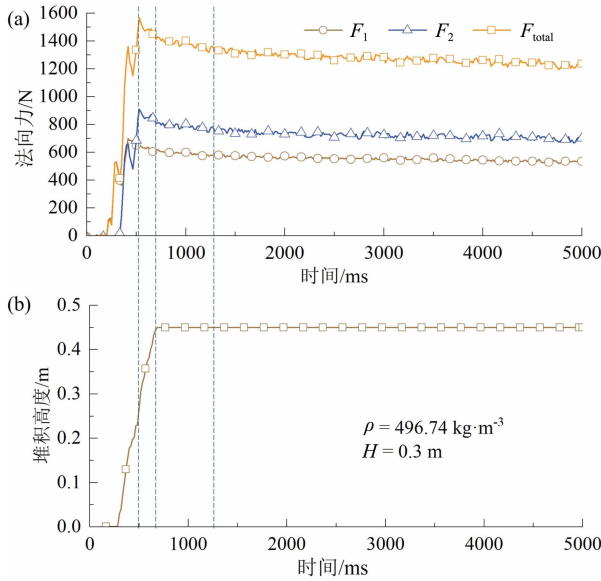


图5 法向力、堆积高度时程曲线对比:

(a) 法向力; (b) 堆积高度

Fig. 5 Comparison of normal force and deposition height time histories:

(a) normal force; (b) deposition height

$k_p$  的计算方式如下:

$$k_p = \frac{\cos^2(\varphi + \beta)}{\cos^2\beta \cdot \cos(\beta - \delta) \left[ 1 - \frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\beta - \delta) \cdot \cos(\beta - \alpha)} \right]^2} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为堆积角;  $\beta$  为墙背与竖直面的夹角;  $\varphi$  为湿雪内摩擦角;  $\delta$  为湿雪堆积区与墙面之间的摩擦角。

Tan<sup>[21]</sup> 等计算  $F_n$  时考虑了流动层与堆积区间的摩擦力, 公式如下:

$$F_n = F_s + F_f + F_d \quad (5)$$

式中,  $F_f$  为流动层与堆积区表面之间的摩擦力。

$F_s$  的计算方法与 Ashwood 模型相同。  $F_f$  选用 Voellmy 模型<sup>[29-30]</sup> 计算。

在 Voellmy 模型中, 堆积区与流动层之间的摩擦剪应力  $\tau$  分为摩擦项和湍流项, 计算公式如下:

$$\tau = \mu h_i \rho g \cos \alpha + \frac{\rho g v_i^2}{\xi} \quad (6)$$

式中,  $\mu$  为湿雪内摩擦系数, 取值 0.4;  $\xi$  为湍流系数。

$F_f$  计算公式如下:

$$F_f = \frac{\tau b H_l}{\sin \alpha} \quad (7)$$

$F_d$  采用动量重定向计算, 计算公式如下:

$$F_d = v_i^2 h_i b \rho (1 - \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (8)$$

然而, Ashwood 模型未考虑流动层与堆积区之间的摩擦作用, Tan 模型虽引入摩擦项, 但二者对静压力的估计都比较保守, 未能反映黏性湿雪易形成超高堆积的特征。针对上述不足, 本文参考 Tan<sup>[21]</sup> 等的研究, 提出考虑堆积高度的冲击力学计算模型, 并将该模型与 Ashwood 模型、Tan 模型进行对比分析。

### 3.2 “分层直冲—跃顶高抛—超顶”堆积模型演化

不同冲击阶段下总荷载中各分项荷载的占比存在显著差异, 为揭示湿雪雪崩冲击挡墙的力学机制, 需进一步明确不同冲击阶段的判别条件及冲击过程中堆积高度的演化规律。

为便于确定堆积高度的演变规律及其最大值, 对湿雪雪崩的运动和冲击过程作以下假设: (1) 湿雪流视为不可压缩、均匀连续介质, 其垂直于运动方向的横截面为矩形; (2) 根据连续介质力学理论, 湿雪雪崩在动量改向前后速度和流深保持恒定。

#### 3.2.1 “分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积模型”判别条件

堆积高度与拦挡结构高度、最大堆积高度之间的相对关系, 是判别不同冲击阶段的依据, 其中关键在于确定最大堆积高度。

堆积区到达最大堆积高度时, 湿雪雪崩速度的动能完全转化为重力势能及摩擦耗能, 由能量守恒可得:

$$E_k = E_g + E_f \quad (9)$$

式中,  $E_k$  为垂直于流深方向单位面积的湿雪流动能;  $E_g$  为重力势能;  $E_f$  为摩擦耗散能。

$E_k$  计算公式如下:

$$E_k = \frac{h_0 \rho v_0^2}{2} \quad (10)$$

式中,  $h_0$  为湿雪雪崩的平均流深;  $v_0$  为湿雪雪崩的平均流速。

湿雪雪崩单元体在堆积高度为  $H_{\max}$  时重力势能计算公式如下:

$$E_g = h_0 \rho H_{\max} g \quad (11)$$

堆积区与流动层之间的摩擦耗散项  $E_f$  由 Voellmy 模型得出:

$$E_f = \frac{\tau H_{\max}}{\sin \alpha} \quad (12)$$

由式(9)~(12)可得:

$$H_{\max} = \frac{h_0 g v_0^2}{2(h_0 \rho g \sin \alpha + \tau)} \quad (13)$$

综上所述,“分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积”模式的判别条件为:

- (1) 如果  $H_t < H$ , 则判定为分层直冲;
- (2) 如果  $H \leq H_t < H_{\max}$ , 则判定为跃顶高抛;
- (3) 如果  $H_t = H_{\max}$ , 则判定为超顶堆积。

### 3.2.2 堆积高度的时程演化

假设湿雪雪崩以  $v_t$  和  $h_t$  冲击刚性挡墙, 湿雪雪崩内摩擦角为  $\varphi$ , 冲击挡墙及堆积区前后流动层的厚度不发生变化。堆积区的堆积高度为  $H_t$ ,  $t$  时刻的堆积区堆积长度  $OA$  为  $S_t$ , 堆积区上覆面  $AD$  长度为  $L_t$  (如图 6 所示)。  $t$  时间内碎屑流在拦挡结构前堆积的总体积  $V$  的计算公式如下:

$$V = V_d + V_a \quad (14)$$

式中,  $V_d$  为堆积区体积;  $V_a$  为堆积区上流动的湿雪流体积。

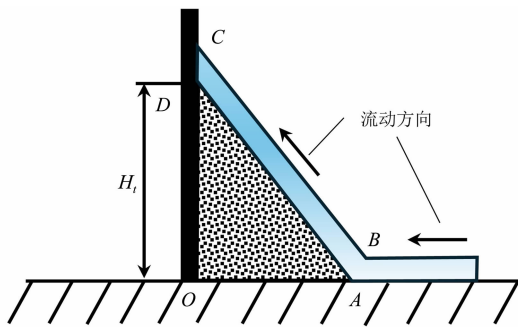


图 6 湿雪雪崩冲击挡墙结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of wet-snow avalanche impact on the rigid wall

为了简化计算, 假设堆积区近似为三棱柱, 碎屑流堆积区为  $OAD$  组成的三角形区域, 可得  $L_t$ 、 $H_t$  和  $S_t$  之间的几何关系为:

$$H_t = L_t \sin \alpha = S_t \tan \alpha \quad (15)$$

由质量守恒得:

$$M_t = \int v_t h_t b \rho dt = \left( \frac{H_t^2}{2 \tan \alpha} + \frac{h_t H_t}{\sin \alpha} \right) b \rho \quad (16)$$

式中,  $M_t$  为  $t$  时间内流入的质量。

进一步求得  $H_t$  与  $t$  的关系为:

$$H_t = -\frac{h_t}{\cos \alpha} + \sqrt{\left( \frac{h_t}{\cos \alpha} \right)^2 + \frac{2 \int v_t b \rho dt \tan \alpha}{b \rho}} \quad (17)$$

已有研究<sup>[31]</sup>表明, 碎屑流初始冲击时会产生向上射流, 使部分来流难以完全沉积。按照质量守恒计算的堆积高度会显著高于实际值, 在此引入折减系数  $k_1$  用来校正理论计算公式, 计算公式如下:

$$H_t = k_1 \left( -\frac{h_t}{\cos \alpha} + \sqrt{\left( \frac{h_t}{\cos \alpha} \right)^2 + \frac{2 \int v_t b \rho dt \tan \alpha}{b \rho}} \right) \quad (18)$$

对分层直冲与跃顶高抛两个阶段进行分析, 通过参数反演确定系数  $k_1$  取 0.7 时, 理论计算的堆积高度与实验结果最为吻合, 具体对比如图 7 所示。

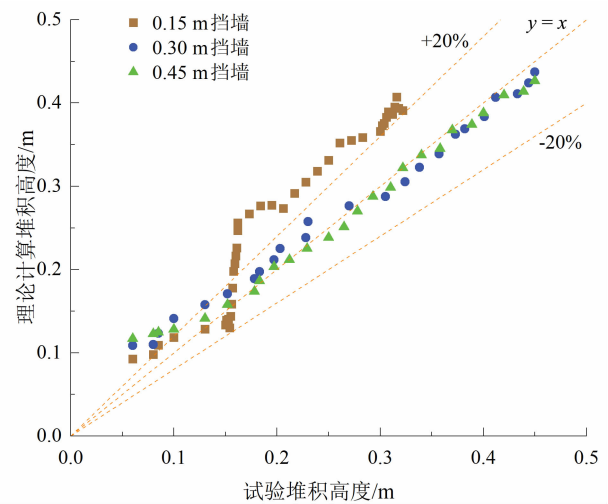


图 7 理论与实验的堆积高度比较

Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental deposition height

在 0.15 m 挡墙工况下, 理论值明显高于实验值。其原因主要在于跃顶高抛初期堆积区规模较小, 对后续来流的拦阻与耗能作用较弱, 导致堆积区发育缓慢; 随着后续来流持续挤压, 堆积高度逐渐呈线性增长。理论计算中偏大的堆积高度导致静压力估计偏高, 进而使冲击力计算结果偏于保守, 这在实际工程设计中具备一定的合理性。

0.30 m 挡墙和 0.45 m 挡墙工况下, 理论值与实验值的差异程度采用双样本  $t$  检验中的  $P$  值来表征,  $P$  值用于检验两组数据均值差异的显著性。当  $P$  值大于显著性水平时, 认为两组数据的均值不存在显著差异, 表明二者具有较高的一致性。在 5% 的显著性水平下, 本文模型的最小  $P$  值为 0.864, 大于 0.05, 说明理论计算结果与实验结果之间不存在显著差异。

### 3.3 基于堆积高度的冲击力学模型

#### 3.3.1 冲击力学模型建立

为准确描述湿雪雪崩对拦挡结构的冲击力学行为,本节参考 Tan<sup>[21]</sup> 等的研究,将总冲击力分为动压力、静压力和摩擦力,并结合实验观测,建立了考虑堆积高度的冲击力学计算模型,挡墙受力如图 8 所示。

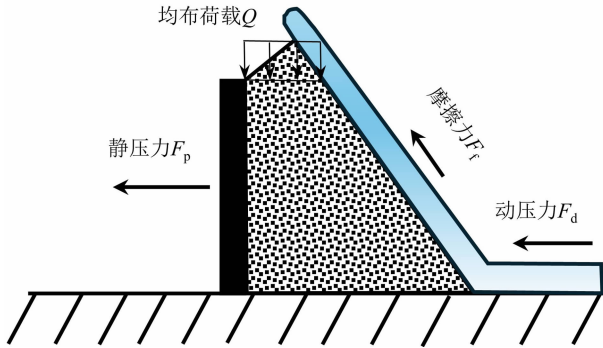


图 8 挡墙受力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of forces acting on rigid wall

#### (1) 动压力

在分层直冲阶段,来流动量完全被拦挡结构和堆积区拦截;跃顶高抛阶段动量发生转向后的残余动量一部分以溢流形式越过结构,另一部分由堆积区与流动层之间的摩擦作用耗散;超顶堆积阶段动量改向后的残余动量全部由堆积区与流动层之间的摩擦作用耗散。由此可见,不同冲击阶段下的湿雪雪崩动量传递与耗散机制存在差异,动压力  $F_d$  可以由下式计算:

$$F_d = \begin{cases} v_i^2 b h_i \rho & H_i < H \\ v_i^2 h_i b \rho (1 - \cos \alpha + \sin \alpha) & H_i \geq H \end{cases} \quad (19)$$

#### (2) 静压力

湿雪具有较强黏聚性,受挤压时易发生黏结,其堆积形态表现为堆积高度超过结构高度,且堆积角度  $\alpha$  较大。若直接将堆积角度带入式(4)中计算会明显高估静压力,若忽略高出结构顶部的堆积区部分,其计算值又明显偏小。针对这一问题,本文依据不同冲击阶段,提出一种新的静压力的计算方法。

为此,引入均布荷载  $Q$ ,其是与堆积高度相关的分段函数。在分层直冲阶段,堆积高度即为挡墙受力高度,此时荷载  $Q$  为 0;在跃顶高抛和超顶堆积阶

段,堆积高度大于挡墙高度,按挡墙结构高度将堆积区分为上下两部分,其中高出挡墙部分等效为施加于结构上的均布荷载  $Q$ , $Q$  的计算取  $t$  时刻的最大堆积高度,则:

$$Q = \begin{cases} 0 & H_i < H \\ (H_i - H)\rho g & H \leq H_i < H_{\max} \\ (H_{\max} - H)\rho g & H_i = H_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

$F_p$  的计算公式为:

$$F_p = \begin{cases} 0.5 k_p \rho g H_i^2 & H_i < H \\ 0.5 k_p \rho g H^2 + (H_i - H) H \rho g & H \leq H_i < H_{\max} \\ 0.5 k_p \rho g H^2 + (H_{\max} - H) H \rho g & H_i = H_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

#### (3) 摩擦力

摩擦力项  $F_f$  由式(7)计算,Voellmy 模型中的  $\mu$  取值 0.44; $\xi$  依据以往研究取得,Bartelt<sup>[30]</sup> 等人建议  $\xi$  取值为  $250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

#### 3.3.2 冲击力学模型验证

为验证本文冲击力计算模型合理性与准确性,将 Ashwood 模型、Tan 模型以及本文模型的计算结果与实验测得数据进行对比。经双样本  $t$  检验,在显著性水平为 5% 时,三种工况下本文模型的最小  $P$  值为 0.362,大于 0.05,表明理论计算结果与实验结果之间不存在显著差异。三种挡墙高度工况下,各模型理论结果与实验结果的对比如图 9 所示。总体而言,本文模型的理论结果与实验结果吻合较好,多数数据点的相对误差控制在  $\pm 20\%$  以内。相比之下,Ashwood 模型和 Tan 模型计算结果均明显低于

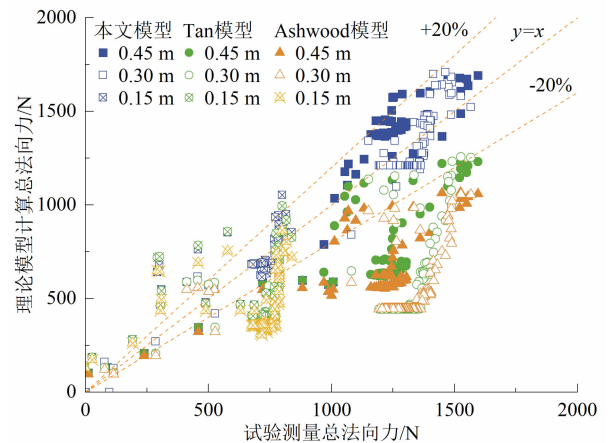


图 9 理论与实验结果的法向力比较

Fig. 9 Comparison of normal forces between theoretical and experimental results

实验结果。

0.3 m 挡墙工况下三种模型与实验的法向力及冲量时程对比如图 10 所示。本文模型在全时程内与实验趋势一致,能够捕捉峰值后的缓降与残余值变化;峰值附近虽存在局部偏差,但不影响峰后受力主控形态。相比之下,Tan 模型和 Ashwood 模型在峰值阶段及峰后阶段的计算结果均偏低,且峰后衰减过快。这主要是由于两者对静压力的估计偏低,因而难以反映湿雪冲击过程中峰后持续受力的特征。

鉴于湿雪冲击具有明显的峰后持续受力与累积效应,若仅以峰值法向力作为评估指标,易忽略荷载作用历时对结构整体响应的影响。因此,引入冲量时程具有明确的工程与力学意义。作为力时程的时间积分,冲量可综合表征荷载幅值与作用历时,反映全过程动量输入的累积强度;同时,受积分平滑效应影响,其对局部波动与高频噪声相对不敏感,更适于检验模型在全过程层面的稳健性。如图 10 所示,本文模型的冲量时程演化与实验结果总体一致,尤其在峰后残余阶段仍能保持与实验结果相近的累积增长速率,表明该模型不仅能够合理表征峰值阶段的快速动量交换,也能够反应静压力主导下的持续累积输入。而 Tan 与 Ashwood 模型由于中后期法向力估计偏低,最终总冲量偏小,从而在结构整体稳定性及安全储备评估中可能存在非保守性。

0.30 m 挡墙工况下本文模型中动压力、静压力与摩擦力的时程变化如图 11 所示。(1)在分层直冲阶段,动压力为总冲击力的主导分量,静压力和摩擦力占比较小,说明冲击初期堆积区尚未充分发育,动力效应占主导。(2)进入跃顶高抛阶段后,随着堆积区持续发育,动压力占比逐步减小,静压力占比相应增大,结构受力机制由动压力主导逐步转为静压力主导。摩擦力占比虽在此阶段达到峰值,但仍低于 10%,表明其对总冲击力的贡献有限。(3)在超顶堆积阶段,受雪崩流尾部流速与流深减小影响,动压力与摩擦力进一步衰减,静压力基本保持稳定,成为总冲击力的主要组成部分。

## 4 讨论

本文基于嘎隆拉现场滑槽实验,围绕湿雪雪崩冲击刚性挡墙问题,揭示湿雪黏性条件下“分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积”的三阶段冲击模式,并建立考虑堆积高度演化的冲击力学模型。与既有研究<sup>[15-20]</sup>主要针对干雪雪崩或非黏性颗粒流、强调峰值动压力控制的研究思路不同,本文将湿雪黏聚作用引起的堆积形态演化作为影响挡墙全过程受力的关键因素,阐明了冲击荷载由动压力主导向堆积静压力主导的阶段性转变机制,更符合湿雪工况下峰后持续受力显著的实际特征。

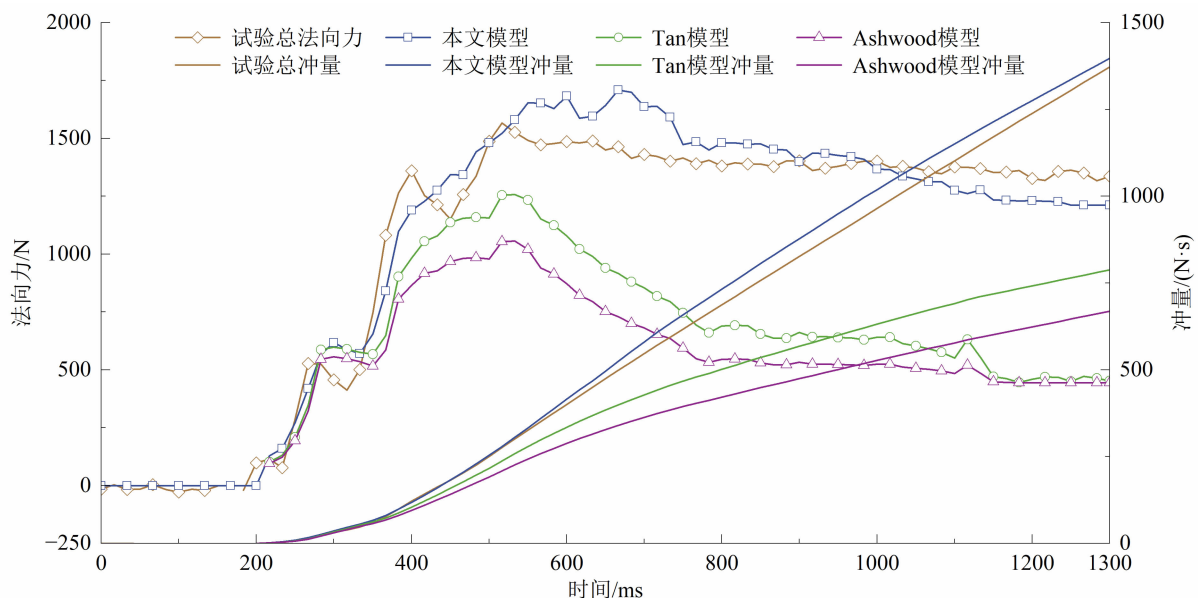


图 10 三种理论模型计算与实验测量的法向力及冲量时程对比

Fig. 10 Comparison of normal-force and impulse time histories between three theoretical models for calculation and experimental measurement

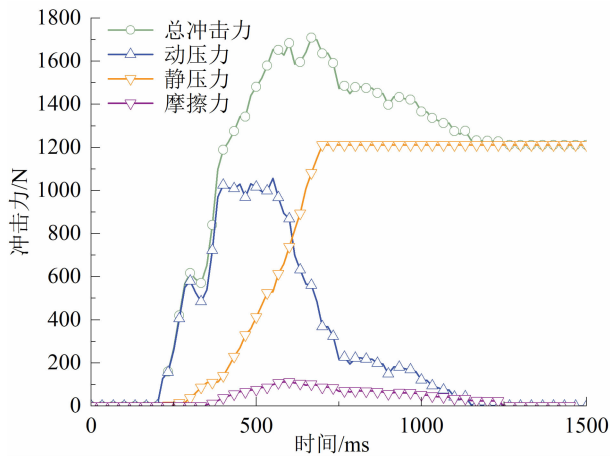


图 11 冲击分力时程曲线

Fig. 11 Time histories of impact force components

传统模型在湿雪工况下低估冲击作用的主要原因在于,其静压力项多基于简化的侧向土压力假设,难以反映湿雪在黏聚作用下易形成高堆积特征,导致墙高以上堆积对挡墙的附加作用被弱化或忽略,进而使峰后残余受力与冲量出现系统性偏小。针对这一不足,本文将超顶堆积部分作为附加载荷引入静压力计算,并将堆积高度时程与冲击阶段判别耦合至冲击力演化框架中,使模型能够统一描述峰值阶段与峰后阶段。多工况对比结果表明,本文模型在不同挡墙高度条件下均与实验结果较为一致,多数数据点误差控制在  $\pm 20\%$  范围内,说明该模型具有较好的稳健性。

本文基于质量守恒建立堆积高度时程关系,并考虑湿雪冲击初期射流引起的“非完全沉积”现象,引入折减系数对初期堆积高度进行修正。该折减系数可视为表征射流作用与沉积效率耦合效应的等效参数,能够减弱理想沉积假设在早期阶段带来的系统偏差。需要指出的是,折减系数与湿雪含水率、温度、颗粒黏聚特征等密切相关,具有工况依赖性,因此在不同雪性、不同温度或更大尺度条件下应用时,仍需结合现场观测或实验数据进一步标定。

分力分析结果表明,峰后受力维持的主控因素主要是静压力及其随堆积高度的演化过程。因此,湿雪工况下挡墙设计不宜仅以峰值压力作为控制指标,尤其在存在超顶堆积风险时,墙高以上堆积的附加作用可能成为影响峰后安全储备的关键因素。工程设计与校核中,应同时关注峰值冲击力与峰后残余静压力,并将超顶风险识别作为挡墙高度选取与

结构优化的重要约束条件。

本文研究仍存在一定局限性:其一,实验温度与雪性条件相对集中,研究结论主要适用于弗劳德数为 2~5 的湿雪雪崩,温度变化对雪体黏聚性、射流行为及堆积形态的影响尚未进一步研究;其二,冲击过程中雪体密度与含水率的动态演化未被直接测量并纳入模型;其三,现场滑槽实验存在尺度效应与边界条件简化,模型参数在外推至更大尺度或不同地形/结构形式(如柔性结构、复合结构)时仍需进一步验证。后续研究可在多温度、多含水率与多尺度条件下开展系统实验,并结合数值模拟量化关键参数的敏感性及其可迁移性,以进一步提高模型的工程适用性。

## 5 结论

(1) 实验湿雪雪崩冲击刚性挡墙过程中呈现“分层直冲—跃顶高抛—超顶堆积”三阶段演化模型。该冲击模型揭示冲击荷载由动压力主导逐步向堆积静压力主导转变的过程特征。

(2) 基于能量守恒提出了最大堆积高度计算方法,基于质量守恒建立了堆积高度时程计算公式,并考虑雪崩射流作用引入折减系数。实验验证表明,当折减系数  $k_1$  取 0.7 时,计算结果与实测堆积高度吻合较好。

(3) 将超顶堆积部分作为附加载荷引入静压力计算,建立基于堆积高度的冲击力学模型,改进了传统模型对超顶堆积贡献表征不足的问题。对比结果表明,本文模型计算结果与实验结果较为一致,相对误差整体控制在 20% 以内。实验冲击过程中挡墙受力从动压力为主转变为静压力为主,摩擦力占比最高仍小于 10%,对总冲击力贡献有限。

## 参考文献 (References)

- [1] 除多. 西藏雪崩灾害及其应对措施研究[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(1): 117 - 126. [CHU Duo. Study on avalanche hazards and response measures in Tibet area [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, 42(1): 117 - 126] DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2022.01.017
- [2] SCHWEIZER J, JAMIESON J B, SCHNEEBELI M. Snow avalanche formation [J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(4): 1016. DOI: 10.1029/2002RG000123
- [3] TAKAHASHI T. Debris flow: Mechanics, prediction and

- countermeasures [M]. London: Taylor & Francis, 2007: 24–25.
- [4] KERN M, BARTELT P, SOVILLA B, et al. Measured shear rates in large dry and wet snow avalanches [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, **55**(190): 327–338. DOI: 10.3189/002214309788608714
- [5] KERN M A, BARTELT P A, SOVILLA B. Velocity profile inversion in dense avalanche flow [J]. *Annals of Glaciology*, 2010, **51**(54): 27–31. DOI: 10.3189/172756410791386643
- [6] HOFMANN R, BERGER S. Impacts of gravitational mass movements on protective structures—rock avalanches/granular flow [J]. *Geosciences*, 2022, **12**(6): 223. DOI: 10.3390/geosciences12060223
- [7] FANG Jun, CUI Yifei, LIU Haiming. Effects of retained dry material on the impact, overflow and landing dynamics [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, **16**(9): 3629–3640. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.11.024
- [8] FANG Jun, CUI Yifei, LIU Haiming, et al. Influences of deposition upslope the barrier on the dynamic impact of dry granular flow [J]. *Engineering Geology*, 2023, **323**: 107212. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107212
- [9] SOVILLA B, MCELWAIN J N, SCHAER M, et al. Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurements from Vallée de la Sionne [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, **115**: F02016. DOI: 10.1029/2009j001390
- [10] MCCLUNG D M, GAUER P. Maximum frontal speeds, alpha angles and deposit volumes of flowing snow avalanches [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, **153**: 78–85. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.04.009
- [11] SOVILLA B, SONATORE I, BÜHLER Y, et al. Wet-snow avalanche interaction with a deflecting dam; Field observations and numerical simulations in a case study [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, **12**(5): 1407–1423. DOI: 10.5194/nhess-12-1407-2012
- [12] SOVILLA B, SCHAER M, RAMMER L. Measurements and analysis of full-scale avalanche impact pressure at the Vallée de la Sionne test site [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, **51**(2–3): 122–137. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.05.006
- [13] FAUG T, CHANUT B, NAAIM M, et al. Avalanches overflowing a dam: Dead zone, granular bore and run-out shortening [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, **49**(1): 77–82. DOI: 10.3189/172756408787814799
- [14] FAUG T, BEGUIN R, CHANUT B. Mean steady granular force on a wall overflowed by free-surface gravity-driven dense flows [J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* [2001–2015], 2009, **80**(2): 21305–21305. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.021305
- [15] JIANG Yuanjun, FAN Xiaoyi, SU Lijun, et al. Experimental validation of a new semi-empirical impact force model of the dry granular flow impact against a rigid barrier [J]. *Landslides*, 2021, **18**(4): 1387–1402. DOI: 10.1007/s10346-020-01555-8
- [16] JIANG Yuanjun, TOWHATA I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, **46**(4): 713–729. DOI: 10.1007/s00603-012-0293-3
- [17] JIANG Yuanjun, ZHAO Yu, TOWHATA I, et al. Influence of particle characteristics on impact event of dry granular flow [J]. *Powder Technology*, 2015, **270**: 53–67. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.10.005
- [18] YU Fangwei, SU Lijun, LI Xinpo, et al. Impact dynamics of granular flow on rigid barriers: Insights from numerical investigation using material point method [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, **21**(12): 4083–4111. DOI: 10.1007/s11629-024-9032-y
- [19] LI Xinpo, YAN Qiwei, ZHAO Shuxi, et al. Investigation of influence of baffles on landslide debris mobility by 3D material point method [J]. *Landslides*, 2020, **17**(5): 1129–1143. DOI: 10.1007/s10346-020-01346-1
- [20] ASHWOOD W, HUNGR O. Estimating the total resisting force in a flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(10): 1700–1717. DOI: 10.1139/cgj-2015-0481
- [21] TAN Daoyuan, YIN Jianhua, QIN Jieqiong, et al. Experimental study on impact and deposition behaviours of multiple surges of channelized debris flow on a flexible barrier [J]. *Landslides*, 2020, **17**(7): 1577–1589. DOI: 10.1007/s10346-020-01378-7
- [22] 郝建盛, 李兰海. 雪崩灾害防治研究进展及展望[J]. *冰川冻土*, 2022, **44**(3): 762–770. [HAO Jiansheng, LI Lanhai. Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44**(3): 762–770] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0075
- [23] UPADHYAY A, KUMAR A, CHAUDHARY A. Velocity measurements of wet snow avalanche on the Dhundi snow chute [J]. *Annals of Glaciology*, 2010, **51**(54): 139–145. DOI: 10.3189/172756410791386580
- [24] BARTELT P, MCADELL B W. Granulometric investigations of snow avalanches [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, **55**(193): 829–833. DOI: 10.3189/002214309790152384
- [25] HÁKONARDÓTTIR K M, JÓHANNESSON T, TIEFENBACHER F, et al. Avalanche braking mound experiments with snow: Switzerland-March 2002 [R]. Reykjavík: Veeurstofa Íslands, 2003: 1–19.
- [26] KERN M A, TIEFENBACHER F, MCELWAIN J N. The rheology of snow in large chute flows [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, **39**(2/3): 181–192. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.03.006
- [27] NAAIM M, DURAND Y, ECKERT N, et al. Dense avalanche friction coefficients: Influence of physical properties of snow [J].

- Journal of Glaciology, 2013, **59** (216): 771 – 782. DOI: 10.3189/2013JoG12J205
- [28] EIDEVG T, THOMSON E S, KALLIN D, et al. Angle of repose of snow: An experimental study on cohesive properties [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, **194**: 103470. DOI: 10.1016/j.coldregions. 2021.103470
- [29] ZHUANG Yu, MCARDELL B W, BARTELT P. Comparative analysis of  $\mu(I)$  and Voellmy-type grain flow rheologies in geophysical mass flows; Insights from theoretical and real case studies [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2025, **25**(6): 1901 – 1912. DOI: 10.5194/nhess – 25 – 1901 – 2025
- [30] BARTELT P, SALM B, GRUBER U. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining [J]. Journal of Glaciology, 1999, **45** (150): 242 – 254. DOI: 10.3189/s002214300000174x
- [31] WANG Dongpo, ZHANG Xiaomei, SHEN Wei, et al. Dynamic response of debris flows impacting curved joint check dams [J]. International Journal of Sediment Research, 2022, **37**(5): 589 – 600. DOI: 10.1016/j.ijsrc. 2022.04.001

## Experimental Study on the Impact of Wet Snow Avalanche on Rigid Retaining Walls

GUO Kun<sup>1,2</sup>, JIANG Yuanjun<sup>1\*</sup>, ZHU Yuanjia<sup>1,2</sup>, ZHAO Binbin<sup>3</sup>, WEI Yueyu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Grid Electric Power Engineering Research Institute Co., Ltd., State Grid Corporation of China, Beijing 100069, China;

4. School of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Wet-snow avalanches occur frequently in southeastern Xizang, China and pose severe threats to regional economic and social security. Previous studies primarily focused on the impact of dry-snow avalanches on structures, with relatively limited research on wet snow avalanches.

In this study, it conducted a series of in-situ chute experiments in the vicinity of the Galongla Mountain, southeastern Tibet Plateau of China to investigate the interaction between wet-snow avalanche and rigid wall. It revealed an impact model of wet-snow avalanche characterized by three stages: stratified direct impact — over-top projecting — super-top accumulation, which quite possibly was due to cohesive forces existed in wet-snow. Based on the in-situ experiments, the study established discriminant conditions for the three impact stages, and a formula for calculating accumulation height against time was proposed, which was verified that when the reduction coefficient was set to 0.7, the calculated results closely matched the experimental data. Furthermore, a geophysical impact model based on accumulation height was developed. By comparisons with Ashwood's model and Tan's model, it demonstrated that the calculated results by the proposed model aligned more closely with experimental data, while the two conventional models yielded significantly lower values, particularly for the super-top accumulation stage. The evolution of each force component's proportion in the total impact force was quantitatively analyzed, elucidating the transition mechanism from dynamic pressure dominance to static pressure dominance.

The research findings provide an important reference for the design of disaster prevention and mitigation measures for wet snow avalanches.

**Key words:** wet-snow avalanche; rigid wall; impact force; deposition height; in-situ experiment

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)