

文章编号: 1008-2786-(2013)4-425-09

## 雪崩防治工程研究与应用现状

刘大翔<sup>1 2 3</sup> 程尊兰<sup>1</sup> 赵鑫<sup>1 3</sup> 黄金辉<sup>1 3</sup> 刘建康<sup>1 3</sup>

(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. 三峡大学土木与建筑学院/三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 雪崩是对高寒山区房屋、设施、道路安全威胁最大的自然灾害之一。在目前雪崩监测预警技术还很不完善的情况下, 发展灾害防治工程技术是避免或减轻雪崩对人类生命财产损失的重要措施。对国际上常用雪崩防治工程进行分类, 重点按作用手段分别阐述了各种防治工程的研究与应用现状, 对防治工程研究进展、适用范围、设计要求、应用情况等关键问题进行了总结和探讨。研究认为, 目前的雪崩灾害防护工程存在修筑标准欠缺、雪崩机理不明确、工程设计参数计算不合理、试验模拟不理想、基础理论研究落后于实践活动等不足, 并建议从工程综合配置、雪崩与防护结构相互作用、工程设计参数定量化研究、开发积雪清理技术、构建监测预警系统等方面开展先行工作。

**关键词:** 雪崩; 防治工程; 分类; 现状

**中图分类号:** P512, X141, X43

**文献标志码:** A

雪崩与滑坡、崩塌、泥石流和山洪共同构成了山区主要自然灾害类型。受气温条件影响, 雪崩往往发生在人烟稀少的高海拔地区, 过去常常被人类忽视。随着人类活动在雪山地区的逐渐涉及和全球气候变化的影响, 雪崩对人类生命财产的影响程度及雪灾发生频率正逐步扩大, 使得对雪崩的研究正比以往更受到人类重视。自1950年以来, 奥地利已有超过1600人死于雪崩<sup>[1]</sup>; 加拿大大规模雪崩发生次数由1990年以前的8.5起/a增长到目前的12.5起/a<sup>[2]</sup>; 冰岛过去26年来因雪崩造成的直接经济损失超过16亿欧元<sup>[3]</sup>; 喜马拉雅西部地区因雪崩死亡的人数已接近40人/a<sup>[4]</sup>; 我国近年来仅天山地区因雪崩造成的死亡就达10人/a。从瑞士等国家已知的雪崩发生密度和频率推测, 每年全球都要发生

数万起雪崩<sup>[5]</sup>。

灾害的频发促进了雪崩研究的发展。多年以来, 发达国家对如何防治雪崩灾害进行了长期探索, 并初步形成了一套监测、预警、评估、防御措施, 而发展中国家限于经济水平, 对经济重要性不高的雪山地区的雪害防治鲜有涉足。在雪崩灾害防治过程中, 工程结构措施是重要环节, 其合理性与稳定性直接影响防治效果。工程结构虽然造价较高, 但因其作用有效性, 已在发达国家得到了广泛应用。Fuchs<sup>[6]</sup>研究了瑞士达沃斯地区1950—2000年间雪崩工程防护结构产生的效费比, 将建筑设施和人类生命均用货币价值衡量, 并考虑被保护地区的税收问题, 发现某些区域的效费比高达40:1。可见, 工程结构在雪崩灾害防治中的作用效果是明显的。经过

收稿日期(Received date): 2013-05-09; 改回日期(Accepted): 2013-06-19。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(41371038, A0971015); 交通运输部科技项目(201231879210); 中交股份科技研发项目(2011-ZJKJ-04)。[National Natural Science Foundation of China 41371038, A0971015]; Science and Technology Project of the Ministry of Transport(201231879210); The CCCC Technology R & D Projects(2011-ZJKJ-04)。

作者简介(Biography): 刘大翔(1987-), 男(汉族), 湖北潜江人, 博士研究生, 主要从事山地灾害防治研究。[Liu Daxiang(1987-), Male(Ethnic Han Chinese), Qianjiang city, Hubei province, doctoral student, engaged in research work of mountain hazards.] E-mail: liudaxiang004@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 程尊兰(1952-), 女(汉族), 四川隆昌人, 研究员/博导, 主要从事山地灾害防治研究。[Cheng zunlan(1952), Female(Ethnic Han Chinese), Longchang county, Sichuan province, researcher/doctoral tutor, engaged in research work of mountain hazards.] E-mail: czl@imde.ac.cn

合理设计的工程措施不仅能有效降低被保护对象受到的威胁,还能使结构的防护能力充分发挥,令有限资金的利用率最大化,也为政府组织抗灾救灾工作提供技术支撑。

## 1 雪崩及其分类

### 1.1 雪崩

积雪和山坡是形成雪崩的基本要素,因此陡坡上有深厚积雪的任何地方都可以产生雪崩<sup>[5]</sup>。大部分雪崩发生在人迹罕至的偏远地区,但一些重要基础设施如公路、铁路、房屋、野外台站、滑雪场等所受到的威胁不容忽视。

目前,雪崩机制尚未弄清,现有研究多为雪崩特性研究,对雪崩的定义也众说纷纭。Ganju<sup>[4]</sup>认为雪崩是山坡上部积雪结构坍塌所产生的结构破坏现象,已记录的雪崩体最大速度可达 56 m/s,相应冲击力可达 50 t/m<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。Perla<sup>[7]</sup>指出,雪崩是一堆含有石块、土壤和积雪的迅速向坡下运动的雪体。Schaerer<sup>[8]</sup>定义雪崩是指大量雪体向山坡下部运动的现象。日本冰雪协会<sup>[9]</sup>认为,斜坡上的积雪在重力作用下产生的能够快速移动的现象称为雪崩。仇家琪<sup>[5]</sup>则总结了雪崩形成的 4 个必要过程:雪层积累、断裂、运动、堆积。可见,上述定义多局限于对现象的描述,未涉及雪崩发生机理。笔者于 2013 年 3 月前往西藏波密县开展了雪崩形成机制野外实验,利用人工光照和降雨令雪层变质,并通过改变雪层下垫面类型和雪层上部荷载,研究了不同含水率条件下雪层在斜坡上的崩滑极限角度。实验发现,崩滑极限角度与雪层含水率和上部荷载负相关,与摩擦系数正相关。因此,笔者定义雪崩如下:雪崩是斜坡上的雪层因光照、降雨及外力作用等影响因素,导致雪层与下垫面间及雪层层间摩擦力、雪粒间摩擦力和内聚力共同作用产生的阻力小于因重力作用产生的下滑力,出现雪层沿一定的软弱面或软弱带,整体或分散的顺坡向下滑动的现象。

典型的雪崩通常由集雪区、运动区和堆积区 3 部分组成。集雪区内的积雪在高空风的作用下,雪层深厚,往往是当地积雪的几倍,有利于雪崩发生。运动区也称为活动区,其主要特征是:纵断面平直,少弯曲,多波折,横断面呈“U”字形,底部宽阔平坦,运动路线上少见植被。堆积区位于斜坡下部,常与坡积或冲积、洪积扇重合<sup>[10]</sup>。虽然国际上一般将雪

崩路径分为上述 3 部分<sup>[4]</sup>,但 Hutter 认为高速流动的积雪产生的空气冲击力会对堆积区前部的区域产生冲击破坏,因此除上述 3 个分区外,还增加了气浪区<sup>[3]</sup>。

### 1.2 雪崩分类

根据不同的判据,雪崩有多种分类,常见的有按成因、规模、发生频率、滑动面位置、含水率状况、启动方式、运动形态、路径形态、地形条件,各分类的详情可见胡汝骥<sup>[10]</sup>、王彦龙<sup>[11]</sup>的文献。同一次雪崩按不同分类方法可分为多种类型,因此为了准确描述一次雪崩,雪崩分类系统被提出。但基于各自的判断,许多学者和组织提出了各种分类系统,相互间存在混淆,争议不断。1973 年,国际雪冰委员会(ICSI)从路径分区着手,以形态和成因分类为判据基础,构建了被学界统一接受的首个国际雪崩分类系统,可称为形态分类系统或地貌学分类系统<sup>[5]</sup>。笔者认为,实际运用时可根据不同目的对该分类系统加以改进:为了实用,可利用较少判据进行分类;出于专门需要,可考虑补充判据。如胡汝骥<sup>[10]</sup>在中国天山雪崩分类时,将治理雪崩作为实用目的,便以国际雪崩分类系统为基础,主要考虑路径地貌形态,将雪崩分为沟槽型、坡面型和沟坡型 3 类,可在雪崩不同路径分区中针对不同类型雪崩构建相应治理措施。

## 2 雪崩防治工程分类

雪崩威力巨大,会对运动区域内自然景观和人造设施造成强大冲击与覆盖。目前虽难以对大规模快速流动的雪崩进行防治,但一些工程防护措施还是能有效降低小规模低速流动雪崩的发生频率和危害程度。欧洲一些国家已经在雪崩灾害防治中投入了大量资金,如瑞士在过去 50 a 内已投入了 10 亿欧元用于雪崩灾害防治<sup>[3]</sup>。一些发展中国家如中国、印度等也由于经济水平的提高,从 20 世纪 90 年代起也开始了雪崩灾害防治措施的研究与应用<sup>[12]</sup>。纵观国际上常用的雪崩防治工程,可按照如下几种方式进行分类。

### 2.1 按作用有效期分

雪崩防治工程措施按作用有效期可分为长期措施和短期措施。长期措施有:建设防护工程结构、发展具有防护作用的森林、绘制灾害地图、制定土地使用计划等;短期措施有:人工激发积雪、临时结构工

程、道路临时管制等。

## 2.2 按作用方式分

可分为两种不同理念的控制措施:主动防护与被动防护。主动防护是事先采取人工措施(爆破、炮击、震动等)让接近临界状态的积雪受激发而提前崩滑,常用于交通要道和滑雪区的减灾;被动防护则有两层含义:一方面阻止积雪崩滑或降低其运动速度;更重要的作用是若不能阻止,可将积雪导流至安全区域或在雪崩造成损失前令其停止运动。大部分工程措施都属于被动措施。

## 2.3 按作用区域分

该分类方法是基于对国际雪崩分类系统的考虑,对修建防治工程具有很强指导意义。针对集雪区的防治,主要目的是阻止雪崩的发生,其防治工程措施可分为两种,一种是保证集雪区积雪的稳定性,如雪桥、雪耙、拦雪网统归为稳雪工程;另一种是通过改变集雪区积雪的沉积过程条件,以减缓降雪在集雪区的沉积速度,进而降低雪崩发生的规模与频率,如在集雪区两侧山脊修建挡风设施<sup>[3]</sup>。针对运动区和堆积区,则主要以阻拦措施(柔性防护网、阻雪堆、三角木楔、拦挡坝等)和导流措施(劈裂楔、导雪堤、隧道、棚洞等)为主。

## 2.4 按作用手段分

根据作用手段,雪崩防治工程措施还可分为结构工程、人工激发工程和生物工程。结构工程涵盖了稳雪工程、阻雪工程和导雪工程;人工激发工程属于主动逃避雪崩袭击的方法;生物工程主要指在树带界线以下发展具有防护效果的森林植被。其中结构工程和生物工程属于“硬件”治理,人工激发工程属于“软件”治理<sup>[13]</sup>。

# 3 防治工程研究与应用现状

20世纪初期,处于雪域高原的一些欧洲发达国家已着手研究雪崩,目前的研究集中在雪崩动力学<sup>[3,5]</sup>、数值模拟<sup>[14-15]</sup>、灾害监测预警<sup>[4,16-17]</sup>、风险管理<sup>[18]</sup>、土地利用规划<sup>[19]</sup>、森林的影响等<sup>[4,20]</sup>方面。在依靠工程措施治理雪崩方面,多以单纯抑制或改变坡面积雪运动为目的,经验知识多,理论支撑少,难以开展实用的关于坡面积雪运动规律的基础研究。比起发达国家,发展中国家如中国对雪崩的研究起步很晚,直至20世纪50年代才着手进行西南和西北山区雪崩的初步研究,且目前的研究多侧

重于灾害评价<sup>[5,21]</sup>,对工程治理雪崩开展的研究则更晚。

工程治理虽花费较多,但设计得当的建筑物具有很长的时效性<sup>[17,22]</sup>。本文将根据第二章中作用区域和作用手段分类,重点阐述国际上常用雪崩防治工程的研究现状、设计要求、适用条件和应用情况。

## 3.1 稳雪工程

稳雪工程用于集雪区雪崩灾害的防治,常用钢结构或木材拼接而成。一定间距上下排列的稳雪工程将山坡积雪分隔开来,从而使其连贯性丧失,纵向应变削弱<sup>[5]</sup>。据Aulitzky<sup>[23]</sup>的调查,经历过雪崩的受访者中有74%的人证实,雪崩发生时稳雪工程以上的积雪仍保持稳定。Wilhelm<sup>[24]</sup>则表示稳雪工程可使雪崩影响区所受到的风险至少降低15%。因此,稳雪工程在发达国家被视为防治雪崩最有效的措施之一,如瑞士已使用该措施超过120a,其国内稳雪工程总长度已超过600km<sup>[3]</sup>。常用稳雪工程有雪桥、雪耙、稳雪水平台阶、稳雪栅栏等<sup>[25]</sup>,主要目的均用于阻止雪层裂缝与断裂的扩展。

稳雪工程适用坡度为30°~50°,施工设计的关键是工程位置的选择、设计容许雪深 $D_K$ 和各排工程坡距 $L$ 的确定。据经验,稳雪工程首选位置是最高破裂线下部靠近破裂线之处<sup>[3]</sup>。设计容许雪深 $D_K$ 的计算方法已由Gumbel<sup>[26]</sup>给出,但该方法需要研究区域的长期观测资料。为解决此问题,Schellander<sup>[27]</sup>研究了一种利用短期观测资料推测某区域积雪在大尺度时间范围内基本情况的回溯法,不过已有资料时间跨度至少需为目标设计时间跨度的1/3。瑞士利用该方法已规定结构的最小高度为该区域100a内极端积雪深度,并推荐垂直最小高度值为3~4m<sup>[6]</sup>。对于各排工程的坡距 $L$ ,有数个公式可供计算,但被广泛认可的是Mellor<sup>[27]</sup>给出的算法

$$L = f_L \cdot H_K \quad (1)$$

式中 $H_K$ 为工程垂直水平高度 $H_K = D_K / \cos\alpha$ ;  $f_L$ 为坡距系数 $f_L = \frac{2 \tan\alpha}{\tan\alpha - \tan\varphi}$ ,  $\alpha$ 为山坡倾角,  $\varphi$ 为积雪和地面间的摩擦角。

总之,稳雪工程虽不能完全防止雪崩,但能拦截已经开始运动、尚未获得动量的小雪崩,否则小雪崩将会成为下游的大雪崩,因此在集雪区采取措施是遏制雪崩的有效措施。但目前稳雪工程设计面临的困境是工程位置的选择,如何在雪崩发生前预先确

定破裂线位置仍是目前研究的重点和薄弱点。今后的研究应注重雪崩机理的研究,对明确雪崩发生位置具有重要意义。稳雪工程的缺点是需将原材料搬运至海拔较高的雪崩集雪区,导致造价高昂,1 km 造价超过 100 万美元,在中国还未有得到应用的报道。

### 3.2 阻雪工程

当雪崩经过凹凸不平的山地时,雪崩的能量消耗必然很大<sup>[8]</sup>。阻雪工程正是以此为出发点,旨在降低雪崩运动速度,延长运动时间,以避免危及防护地区,用于运动区和堆积区的防治。在天山积雪站 5 号沟山坡上设置的简易阻雪工程,就于 1969-01-27 成功阻挡了一次较大规模的雪崩<sup>[11]</sup>。阻雪工程的关键是设计高度  $H_z$  的确定,可根据 Mellor<sup>[28]</sup> 提供的公式计算

$$H_z \geq V^2/2g + H_L + H_S \quad (2)$$

式中  $V^2/2g$  为速位差( $V$  为工程前沿雪崩速度);  $H_L$  为雪崩流垂直深度;  $H_S$  为工程前沿极端最大雪深。

常见阻雪工程有柔性防护网、阻雪堆、三角木楔、拦挡坝。柔性防护网与设置在坡脚防止崩落岩块威胁路面的防护网类似,适用于雪崩规模较小、平均雪深 3~5 m 的区域<sup>[5]</sup>。阻雪堆呈锥形,内部由当地地表物质构成,面对雪崩的一面用混凝土壁或干砌片石修筑,其阻雪效果与有效面积和高度有关,常用于坡度  $< 20^\circ$  的山坡。原因在于坡度越大,阻雪堆的有效面积和高度越小。其设计关键在于阻雪堆尺寸与排列位置的布设<sup>[10]</sup>。欧洲自 20 世纪 30 年代已开始用阻雪堆缓冲雪崩,中国在 20 世纪下半叶才开始用浆砌石堆进行阻雪试验。拦挡坝与泥石流防治工程中的拦挡坝类似,致力于减缓积雪流动速度<sup>[29]</sup>。但 Hutter 的研究表明拦挡坝的设计坝高与积雪速度二次方成正比<sup>[3]</sup>,因此拦挡坝在处理低速运动的积雪时效费比较高。Gauer<sup>[30]</sup> 运用蒙特卡罗随机模拟方法和简单的阻碍模型,数值模拟了挪威西部地区一座建在雪崩堆积区的高 16 m、长 75 m 拦挡坝的防护效应,结果表明拦挡坝的存在使得下游区域的安全系数提高了 0.1~0.2。但他们的研究都存在一个问题,未能考虑雪颗粒在运动过程中重结晶引发的积雪特性改变现象,低估了雪崩的冲击力,导致设计值偏小。后文中有关导雪工程的研究也面临同样问题。

总之,理论上若建筑规模足够大的阻雪工程,可

使前锋积雪速度急剧下降,最后总能止住雪崩。但仇家琪<sup>[5]</sup>和 Decaulne<sup>[31]</sup>则认为一旦山坡坡度超过  $40^\circ$ ,阻雪工程就很容易被摧毁,因此阻雪工程常和导雪工程配合使用。据此,阻雪工程的合理规模设计和工程组合配置可成为今后研究的方向。此外,阻雪工程的最大阻雪量计算参数中涉及雪崩体与下垫面的摩擦系数,目前该系数仅根据经验估计,但实际上下垫面类型及雪层含水率对该系数影响很大,目前已引起一些学者的关注。

### 3.3 导雪工程

导雪工程应用于运动区和堆积区,是将雪崩体引导至被保护对象所在范围之外的工程设施。一次雪崩的能量很大,单纯依靠阻雪工程难以令雪崩停止运动,若将导雪工程与阻雪工程配合使用,可起到较佳效果。

#### 3.3.1 劈裂楔

劈裂楔也称分流楔,实际上是关于面对称的四面体,建筑或安装时一般令对称面平行于积雪运动路线,可令积雪流经劈裂楔时向两侧分流。国际上已针对劈裂楔的分流作用开展了一系列研究。Tai<sup>[32]</sup>选取了德国 Zugspitze 山区一栋位于海拔 2 700 m 的陡峭山坡上的建筑为被保护对象,研究劈裂楔在雪崩中的分流作用。试验用分别用 1:100 和 1:300 的模型模拟了被保护对象及其周边环境,并分别用直径 2.5 mm 的塑料珠、直径 0.8 mm 的面粉和白糖模拟积雪,可保证内摩擦角为  $35^\circ \sim 45^\circ$ ,与实际情况接近。通过不同材料模拟新旧积雪的叠加,确定了不同形状和尺寸的劈裂楔所能承受的最大雪深。试验还数值模拟了劈裂楔作用下积雪颗粒的运动状态,其结果与物理试验相符。德国达姆施塔特理工大学的 Gray 等人<sup>[33]</sup>也研究了四面体的分流作用,Chiou<sup>[34]</sup>则在不同类型四面体对积雪分流作用的差异性方面开展了一系列研究。

与阻雪堆一样,劈裂楔的设计关键也在于尺寸与排列位置的布设。目前对单个劈裂楔分流作用的研究较多,可用于尺寸的确定,而有关群体效应的研究较少,因此对劈裂楔群的排列设计仍处于探索阶段,尚未得到实践,应成为今后研究的方向之一。

#### 3.3.2 导雪堤

导雪堤用于改变积雪的运动方向,以将积雪引导至对生命财产无危害或危害较小的区域。由于坝体不与积雪发生正面撞击,因此坝高和坝体厚度均较拦挡坝低<sup>[16]</sup>。自 1518 年瑞士的 Leukerbad 地区

遭受雪崩灾害死亡 61 人后,导雪堤便开始作为一种雪崩灾害防护结构得以应用<sup>[35]</sup>。Tai<sup>[36]</sup>研究了导雪堤对粒状雪崩的导流作用,发现积雪在运动过程中会在靠近导雪堤处形成明显的三角形冲击堆,且冲击堆的形态与导雪堤的偏转角、地形条件和积雪特性密切相关。数值模拟结果表明,冲击堆之上的积雪颗粒流处于超临界状态,与冲击堆之下处于亚临界状态的颗粒流相比速度要快,但积雪厚度要小,类似于流体力学中的明渠自由表面流。该研究成果对研究导雪堤与雪崩体间的相互作用有积极意义。

坝体与雪崩运动方向的偏转角  $\beta$  和坝高  $H_b$  是导雪堤设计中的两个重要参数, Schaerer<sup>[8]</sup> 给出的公式是被工程界认可的计算方法之一。其中,坝高计算方法同阻雪工程,设计最大偏转角  $\beta_{\max}$  按下式计算但不超过  $30^\circ$

$$\beta_{\max} = \arcsin\left(\frac{1}{V} \sqrt{\frac{P}{\rho}}\right) \quad (3)$$

式中  $\bar{V}$  为雪崩平均速度;  $P$  为坝体设计最大正压力;  $\rho$  为雪层密度。

两个导雪堤呈倒“人”字形布设即构成破雪堤,其作用介于导雪堤和分流楔之间。此外,导雪堤常和拦挡坝配合使用,体现了“以导为主,导排结合”的原则。冰岛 Flateyri 地区于 1998 年修建了两座导雪堤和一座拦挡坝,以保护当地一个人口密集的村庄,其中左右两座导雪堤呈“人”字形分布构成破雪堤,中间连接一座拦挡坝,三座坝共同构成“A”字形<sup>[37]</sup>,实现了对村庄的多重保护。我国的西南和西北山区也常采用土石型和铅丝笼导雪堤,应用效果较好<sup>[11]</sup>。

### 3.3.3 隧道和棚洞

隧道和棚洞是保证雪崩易发区域道路通畅的重要措施。实际工程中需根据道路行进方向与坡面的位置关系选择隧道或棚洞。当行进路线平行坡面或处于坡面内时,宜选用棚洞,棚洞顶棚的坡度接近山坡坡度<sup>[3]</sup>,棚洞长度则大于雪崩经过道路时的宽度<sup>[28]</sup>。中尼公路聂友段使用棚洞令雪崩从其顶部经过而不堆积于道路上,经事实证明已是防治雪崩的有效措施之一。为防止大规模雪崩撞击对岸反弹后影响道路运营和阻挡大规模雪崩越过道路堵塞波曲河,还在棚洞进出口两端公路外侧分别设置了下挡墙<sup>[38]</sup>。若行进路线与坡面夹角较大,如高架桥面从一座山穿出后又进入另一座山,则推荐在两山之间选用隧道。隧道顶部的圆弧可有效降低高速流下

的积雪对道路的冲击力。20 世纪 90 年代, Rammer 等<sup>[39]</sup>就运用三维数值模拟方法研究了奥地利西部地区一座隧道桥遭受雪崩时的最大容许静荷载,为阿尔卑斯山区相似工程的设计提供了参考。此外,隧道设计时为防止雪崩崩落在洞口,通常在隧道所有出入口向外再延伸  $3 \sim 5 \text{ m}$ <sup>[40]</sup>。

总之,对于公路和铁路来说,与其在集雪区和运动区采取其他任何形式的治理措施,还不如直接防护道路本身来的便宜、简单。今后应在雪崩关键路段增加棚洞和隧道的使用比例,并针对道路特征选取合理的结构形式。

### 3.4 人工激发措施

人工激发属于主动措施,是在积雪自然崩滑前,尝试运用人工手段提前激发雪崩事件,旨在主导雪崩发生时间以规避危害。Agrawal<sup>[41]</sup>认为人工激发措施实际上是雪崩灾害预报工作的扩展,因为只有当积雪接近临界崩滑状态时,人工激发才显得有效。人工激发措施最初并非用于减灾,而是在第二次世界大战中被视作一种极具杀伤力的“武器”,用于消灭途径阿尔卑斯山区雪山坡脚的军队<sup>[42]</sup>。直到 20 世纪 30 年代,欧洲才逐渐将大威力武器(火炮、加农炮等)用于人工释放积雪以降低雪崩灾害。我国在 20 世纪 90 年代也开始利用炸药,并在天山西部雪崩动力学参数确定试验中成功释放了人工雪崩<sup>[43]</sup>。此外,在结构防护工程完成前,也常在雪崩源区多次小量使用人工爆破方法。在哈萨克斯坦大阿尔玛琴卡河流域的雪崩治理中,人工爆破和炮击就不仅用于危险期内雪崩的释放,而且被用作保障结构防护工程施工的有效技术手段<sup>[44]</sup>。随着技术进步,一些不同思路已被提出来,如 1978 年奥地利大型技术研究所就尝试将大块金属板置于危险山坡,在降雪期间按时通电震动便可激发小的无害雪崩<sup>[32]</sup>。

可见,人工激发措施与其他措施相比,是一种成本较低的雪崩防治措施,其关键是激发时间、位置和能量的确定。今后的研究中应加强与雪崩预报工作的结合程度,将更加有利于激发时间、位置和能量的确定。

### 3.5 植被措施

森林的建设是防治雪崩的另一重要措施<sup>[16 45-46]</sup>,属于生物治理工程。Sethi<sup>[47]</sup>总结了森林的作用如下: a. 树木的枝干可起到锚固作用,增强了积雪稳定性; b. 植被的截留效应可降低积雪的沉

积速度,进而减小雪崩发生概率;c. 植被的屏障效应可阻碍积雪与外部环境的能量交换,令积雪温度保持在相对稳定水平,减少了积雪层的种类,利于整体稳定。Luzian<sup>[9]</sup>则用数据表明了森林的作用:奥地利已有记录的3 992次雪崩中有超过1 300次发生在树带界线以下。

造林措施设计中,造林位置和适宜树龄的确定是关键。造林位置主要考虑树带界线的影响。例如喜马拉雅西部地区树带界线的最高海拔是3 500 m,而大约50%的雪崩都发生在海拔3 000 m以下,因此在海拔3 000 m以下的雪崩易发区开展森林建设是可行的<sup>[4]</sup>。关于树龄,Aulitzky<sup>[48]</sup>认为最佳区间是40~270 a,超出此区间的防护效果将降低50%。Sethi<sup>[44]</sup>则认为,森林建设最好与结构工程相结合,这样森林既起到防护作用,其提供的木材又可作为结构工程的原料。因此,对于年龄超出40~270 a的树木,可适当采伐用于建筑临时防护工程,以配合混凝土或钢结构工程。

造林措施面临的主要问题有:树木生长初期因承载力不足,造成难以抵抗积雪下滑力,进而导致死亡率较高的问题;大面积造林成本较高,且投资收益周期较长。

## 4 防治工程研究现状讨论

多年的雪崩灾害防治实践中,工程措施往往比限制危险区域的使用具有优先权,因为土地的限制使用与当地居民的需求存在冲突,而工程结构无此弊端,且具有直观的防护效应。人类已在雪崩灾害防护工程研究方面开展了一系列室内室外试验,在工程设计、施工、维护等方面已积累了一定经验,但仍存在许多不足:

1. 工程修筑标准少。雪崩虽与滑坡、崩塌、泥石流等并称为山地自然灾害主要类型,但人类对其重视程度一直远远落后于后三者,目前国际上只有瑞士、奥地利等少数发达国家出台了专门的设计修筑标准,且大多数工程都是据经验修建。

2. 雪崩机理研究的不完善影响稳雪工程设计。有学者认为雪崩发生是由于雪层与下垫面间结合层抗剪强度低于剪切强度造成的,也有学者认为是由雪层顶部积雪抗拉强度或底部积雪抗压强度降低造成,更有学者认为是由雪层两侧积雪剪切强度降低造成。只有明确了雪崩发生关键位置,稳雪工程的

位置选择才更准确。

3. 稳雪工程坡距确定方法的经验性太强。由3.1中可知坡距系数由雪层和地面间的摩擦系数和山坡坡度共同确定,而计算公式中摩擦系数仅根据坡面平整度分为三档,具有明显局限性。实际上,雪层与地面间的摩擦系数还与雪层底部含水率、下垫面类型密切相关。

4. 对雪崩冲击力估算的不准确影响阻雪工程设计。雪崩体的动能全部消耗于冲击力,但实际上大部分能量消耗于雪崩体的变形和运动中热量的释放,导致冲击力根本不与速度平方成正比,进而影响阻雪工程设计。公式计算的雪崩正面冲击力往往能达到1 MPa,但根据国内外资料,雪崩实际冲击力很少达到该值。此外,实测的雪崩冲击力也往往不准,因为受仪器安装位置、雪崩机率的限制,至今实测资料不多,且冲击力与雪崩体的物理性质关系密切。

5. 阻雪工程效果欠佳,一个冬季能产生一次以上的雪崩路径,而第一次雪崩会使工程有效高度降低,甚至将工程埋平,第二次雪崩时工程将失效,难以持续发挥效应,必须采取措施清除积雪。

6. 未考虑雪层变质的影响。室内模拟防护工程效果时,常参照颗粒流研究成果,选用粉状或颗粒状材料模拟积雪,但实际上雪粒在运动时会产生重结晶现象,其密度、含水率、晶体结构等特性都将产生变化,因此室内试验不能准确反映积雪与防护工程间的相互作用过程。

7. 目前的防护工程,都是单纯的以抑制或改变坡面积雪运动为目的,难以开展实用的关于坡面积雪运动规律的基础研究,这仅反映现实社会的需求,并不能避免实施中的失误。

## 5 进一步研究展望

### 5.1 雪崩防治工程

结合目前已有防治研究的不足,认为可从以下几点进一步开展研究:

1. 雪崩防治工程的综合配置。不同类型的雪崩,其工程治理方法不同,即使同一类雪崩,由于雪崩集雪区、运动区和堆积区地貌特征差异,治理方法也应因地制宜。为了充分发挥工程的防治效应,同时降低多余工程的浪费,可利用数值模拟软件开展防治工程参数设计,不仅考虑单一工程的防护效应,而且考虑群体工程的综合影响范围,这对不同类

型防护工程的优化组合设计极具现实意义。

2. 雪崩与防治工程的相互作用。不仅局限于研究防护工程对雪崩运动过程的影响,也应着重于雪崩体对防护结构的作用,即综合考虑雪崩与防护结构之间的相互作用机理,进而针对典型防护结构类型,建立雪崩条件下结构关键部位受力情况。这不仅有利于防护结构优化设计,而且可用于评估现有结构安全性,为加固措施提供更为准确的依据。

3. 雪崩运动参数与工程设计参数的定量化研究。进一步开展雪崩机理研究,完善依据经验资料分析后得到的估算公式,有利于更加准确评估雪崩与防治工程的相互作用,为工程设计提供依据。

4. 积雪清理技术开发。一次雪崩过后,如不及时清理积雪,阻雪工程在接下来的雪崩中将难以发挥作用,而积雪清理是项困难的工作,因此积雪清理技术也是值得进一步研究的课题。

## 5.2 雪崩监测预警

工程措施具有直观的有效性,但不能保证人和设施的绝对安全,此时采取躲避措施比防护措施显得更为有效。躲避措施的关键是躲避时间点的确定,这就需要构建雪崩警报系统。笔者认为实质上

警报系统属于广义的工程措施,因为需要花费一定人力物力在雪崩发生区域建立数套监测设备构成警报系统。

目前国际上对雪崩的预报研究较多,多是依据气象因子和积雪内部结构监测结果进行预测,常用方法有直接成因法、气候和气象法、雪层因子法等,重点是对雪崩发生前的信息采集分析,并告知公众雪崩发生的可能性。雪崩警报则重点监测雪崩发生和运动时刻产生的振动、声响等特征并实时发出警报,在雪崩威胁来临前为公众撤离提供时间保障,但目前国际上已投入使用的警报系统鲜有报道。笔者认为,雪崩预报与警报应紧密结合,共同构成雪崩监测预警系统。其中,警报系统可参考已成功应用的滑坡、泥石流警报系统,但需改变测量指标及相应设备。据此提出雪崩监测预警系统技术路线如图1。

目前 2/3 的雪崩发生在偏远地区,修建防护工程的效费比很低,而雪崩预警具有投入小、反应快的特点,应将工程措施等“硬件”方案与预警系统等“软件”方案结合起来,针对不同区域构建相应的综合防灾措施,进一步扩大雪崩防治工程投入的效费比。

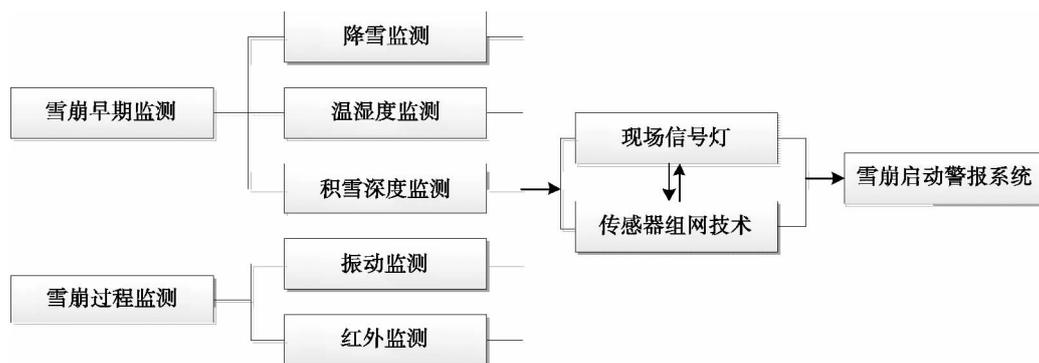


图1 雪崩监测预警系统技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap of avalanche monitoring and warning system

## 参考文献(References)

- [1] Tirol L. Avalanche handbook [M]. Innsbruck: Tyrolia Verlag Press, 2000: 260
- [2] Stethem C, Jamieson B, Schaerer P, et al. Snow avalanche hazard in Canada: a review [J]. Natural Hazard, 2003 (28): 487-515
- [3] Hutter K, Pudasaini S P. Avalanche dynamics [M]. Berlin: Springer Press, 2006: 507-527
- [4] Ganju A, Dimri A P. Prevention and mitigation of avalanche disasters in western himalayan region [J]. Natural Hazard, 2004 (31): 357-371
- [5] Qiu Jiaqi. Snow avalanche [M] Urumqi: Xinjiang Science and

Technology Press, 2005 [仇家琪. 雪崩学 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.]

- [6] Fuchs S, Mcalpin M. The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005 (5): 319-330
- [7] Perla R I. Failure of snow slopes [M]. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- [8] Schaerer P A. Handbook of snow avalanche principles, processes, management and use [M]. Oxford: Pergamon Press, 1981.
- [9] Japan society of ice and snow. Snow dictionary [M]. Tokyo: Press of

- Ancient and Modern College, 1990. [日本冰雪学会. 冰雪词典 [M]. 东京: 古今书院, 1990.]
- [10] Hu Ruji, Jiang Fengqing. Tianshan avalanche and governance in China [M]. Beijing: People's Communications Press, 1989. [胡汝骥, 姜逢清. 中国天山雪崩与治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.]
- [11] Wang Yanlong. China avalanche research [M]. Beijing: Ocean Press, 1992. [王彦龙. 中国雪崩研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992.]
- [12] Fes A. Characteristics and mitigation of the snow avalanche hazard in Kaghan Valley, Pakistan Himalaya [J]. *Natural Hazards*, 1994 (9): 197–213
- [13] Nakamura T. Review and perspective of snow avalanche researches and the application to mitigation and prevention of avalanche disasters [G]//Proceedings of Nakaoka International Symposium on Avalanche Control. Graz: Band Press, 1992.
- [14] Dutykh D, Robert C, Bresch D. Mathematical Modeling of powder – snow avalanche flows [J]. *Studys in Applied Mathematics*, 2011, 127(1): 38–66
- [15] Cordy P, McClung D M, Hawkins C J, et al. Computer assisted avalanche prediction using electronic weather sensor data [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009 (59): 227–233
- [16] Margreth S, Faillettaz J, Funk M, et al. Safety concept for hazards caused by ice avalanches from the Whymper hanging glacier in the Mont Blanc massif [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011 (69): 194–201
- [17] Van Herwijnen A, Schweizer J. Monitoring avalanche activity using a seismic sensor [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011 (69): 165–176
- [18] Höller P. Avalanche hazards and mitigation in Austria: a review [J]. *Nat Hazards*, 2007 (43): 81–101
- [19] Weiss G. The political practice of natural hazards control in Austria and the question of climate change [G]//Steininger K, Weck H. Global environmental change in Alpine regions: recognition, impact, adaptation and mitigation. Cheltenham: Pub Press, 2002: 131–149
- [20] Germain D, Filion L, Hetu B. Snow avalanche activity after fire and logging disturbances, northern Gaspé Peninsula, Quebec, Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2005 (42): 2103–2116
- [21] Xie Zichu, Severskiy I V. Tianshan snow and avalanche [M]. Changsha: Hunan Normal University Press, 1996. [谢自楚, Severskiy I V. 天山积雪与雪崩 [M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996.]
- [22] Weiss G. The protection forest policy in Austria [D]. Vienna: University of Agriculture, 1999: 340
- [23] Aulitzky H. Final report on the results of the Delphi survey on current expectations security against various methods of permanent and temporary avalanche protection [J]. *Releases of the Institute of Torrent and Avalanche Control*, 1980 (12): 39
- [24] Wilhelm C. Cost – effectiveness of avalanche protection measures on roads, Federal Office for the Environment [M]. Bern: Forests and Landscape Press, 1999: 110
- [25] Gubler H. Temporary and permanent avalanche protection measures for tourist facilities [J]. *Releases of the Federal Institute for Snow and Avalanche Research*, 1986 (45): 10
- [26] Gumbel E J. Statistics of extremus [M]. New York: Columbia University Press, 1958: 375
- [27] Schellander H. Extreme value statistics: an efficient method for risk assessment [M]. Innsbruck: Press of the Central Institute of Meteorological and Geodynamic, 2012.
- [28] Mellor M. Dynamics of snow avalanche [M]. Amsterdam: Elsevier, 1978.
- [29] McClung D, Schaerer P. The avalanche handbook [M]. Seattle: The Mountaineers Press, 1993: 271
- [30] Gauer P, Lied K, Kristeensen K. Analysis of avalanche measurements out of the runout area of NGI's full – scale test – site Ryggfonn [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009 (57): 1–6
- [31] Decaulne A. Snow avalanche and debris flow hazards in the fjords of north – western Iceland, mitigation and prevention [J]. *Nat Hazard*, 2007 (41): 81–98
- [32] Tai Y C. Dynamics of granular avalanches and their simulations with shock – capturing and front – tracking numerical schemes [D]. Darmstadt: Darmstadt University of Technology, 2000.
- [33] Gray J, Tai Y, Noelle S. Shock waves, dead zones and particle free regions in rapid granular free surface flows [J]. *J. Fluid Mech*, 2003 (491): 160–181
- [34] Chiou M C, Wang Y, Hutter K. Influence of obstacles on rapid granular flows [J]. *Acta Mechanica*, 2005 (175): 105–122
- [35] Fraser C. Avalanche and snow safety [M]. London: John Murray Publishers Ltd. 1978.
- [36] Tai Y C, Wang Y, Gray J M N T, et al. Methods of similitude in granular avalanche flows [M]. New York: Springer Press, 1999: 415–428
- [37] Sigurðsson F, Tómasson G, Sandersen F. Avalanche defences for Flateyri, Iceland [G]// Hestnes E. 25 years of snow avalanche research: From hazard evaluation to construction of defences. Oslo: NGI Press, 1998: 254–258
- [38] Dang Chao, Cheng Zunlan, Gengxueyong, et al. Disasters and preventive measures along Nie You section of Sino – Nepal Highway [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(2): 201–205 [党超, 程尊兰, 耿学勇, 等. 中尼公路聂友段公路病害及防治对策 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(2): 201–205]
- [39] Rammer L, Schaffhauser H, Sample P. Computed powder avalanche impact pressures on a tunnel – bridge in Au beta erfern – Tirol [G]//Sassa K. IUFRO Division 8 Conference on Environmental Forest Science. Kyoto: Kyoto Univ. Press, 1998: 599–605
- [40] Gao Weidong, Liu Mingzhe, Wei Wenshou, et al. Formation mechanism of snow disasters along railways and their engineering prevention and control [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(5): 90–96 [高卫东, 刘明哲, 魏文寿, 等. 铁路沿线雪害形

- 成机制及其工程防治措施[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 90-96]
- [41] Agrawal K C. Artificial Triggering of avalanches [M]. London: SASE Publication, 1990.
- [42] Armstrong B, Williams K. The avalanche book [M]. Colombia: Fulcrum Golden Press, 1986.
- [43] Qiu Jiaqi, Xu Junrong, Jiang Fengqing, et al. New progress in the research on avalanche dynamics in the Tianshan mountains [J]. Arid Land Geography, 1997, 20(1): 1-8 [仇家琪, 徐俊荣, 姜逢清, 等. 天山雪崩动力学研究新进展[J]. 干旱区地理, 1997, 20(1): 1-8]
- [44] Hu Ruji, Ma Hong, Jiang fengqing. Avalanche and its control in the Almatinki river basin [J]. Arid Land Geography, 1994, 17(2): 44-54 [胡汝骥, 马虹, 姜逢清. 大阿尔玛京卡河流域的雪崩与治理[J]. 干旱区地理, 1994, 17(2): 44-54]
- [45] Gand H. Forest in avalanche control [J]. Releases of Federal Forest Research Centre, 1978(125): 113-127
- [46] De Quervain M. The role of forests in avalanche protection [J]. Journal of Swiss Forestry, 1968(119): 393-399
- [47] Sethi D N. Structural control of avalanches to mitigate avalanche danger [J]. Symposium on Preparedness, Mitigation and Management of Natural Disasters, 1989 (1): 313-318
- [48] Aulitzky H. The human landscape and ecological consequences of forest dieback [G]//Proceedings of the Interpraevent. Graz: Band Press, 1988 (5): 343-356

## Research and Application Situation of Avalanche Prevention and Control Engineering

LIU Daxiang<sup>1 2 3</sup>, CHENG Zunlan<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1 3</sup>, HUANG Jinhui<sup>1 3</sup>, LIU Jiankang<sup>1 3</sup>

(1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Snow avalanche is one type of the largest natural hazards in alpine regions. Because of the monitoring and warning technology is still not perfect at present, developing hazards prevention and control technologies is an important measure to reduce the human life and property loss that cause by snow avalanche. In this paper, some international commonly used prevention and control technologies are classified. The research progress, application scope, design requirement, application situation of these technologies are summarized and discussed. What's more, the paper points out that there are some shortages such as lack of construction standards, avalanche mechanism is not clear, parameters calculation of engineering design is unreasonable, the effect of test simulation is not perfect, the basic theory research is behind the practice activities and so on. Finally, the paper proposes several aspects for future research.

**Key words:** snow avalanche; prevention and control project; classification; current situation