

文章编号: 1000-7598 (2012) 01-0147-08

极端冰雪灾害条件下松散堆积体边坡演化分析

缪海波¹, 殷坤龙¹, 邢林啸¹, 张卓燕²

(1. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074; 2. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

摘 要: 针对 2008 年初南方罕见的极端冰雪气候, 为研究其与地质灾害的相关性, 探讨了极端冰雪灾害条件下均质松散堆积体边坡的演化特征。比较了融雪与降雨触发滑坡的异同点, 通过具体事例分析了融雪触发滑坡灾害的一般规律。引入度日因子与雪雨当量两个物理量, 根据南方极端冰雪气候特征建立了简化的有效融雪模型, 并从渗流场、稳定性及变形 3 个方面模拟计算在不同雨雪当量下均质松散堆积体坡体的演化特征。结果表明, 一定的融雪速率与融雪量对松散堆积体边坡渗流场无影响。随着融雪的持续, 非饱和区基质吸力逐渐减小, 坡体整体稳定性逐渐降低。坡面上水平位移与竖向位移逐渐增大, 表现为水平方向上前缘变形大于后缘, 竖直方向上后缘下错与前缘隆起。在融雪持续一段时间后, 坡体失稳破坏。

关 键 词: 极端冰雪灾害; 融雪; 度日因子; 雪雨当量; 松散堆积体边坡; 演化

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Evolution analysis of loose debris slope under condition of extreme snow hazard

MIAO Hai-bo¹, YIN Kun-long¹, XING Lin-xiao¹, ZHANG Zhuo-yan²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Comprehensive Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In the beginning of 2008, South China encountered the rare extreme snow climate; and in this period many geological hazards happened. In order to study the correlation between the extreme snow climate and geological hazard, this paper explored the evolution characteristics of homogeneous loose debris slope in the condition of extreme snow hazard. The landslide triggered by snowmelt is compared with rainfall to obtain the similarities and differences and then the general law of snowmelt triggering landslide is analyzed through a specific example. Two physical quantities named degree-day factor and snow rainfall equivalent are used to establish the simplified effective snowmelt model based on the characteristics of extreme snow climate in Southern China. The evolution characteristics of the debris slope are simulated from seepage, stability and deformation under the different snow rainfall equivalent proposed above. The results show that a certain snowmelt rate and quantity have no influence on the seepage of the slope. With the snowmelt continuing, the metric suction in the unsaturated zone decreases gradually which causes the whole stability decreasing. The horizontal and vertical displacements of the slope surface increase gradually and the deformation of the front is larger than the back in the horizontal direction as well as the down dislocation in the back and protrusion in the front. After a time of snowmelt the slope fails and slides.

Key words: extreme snow hazard; snowmelt; degree-day factor; snow rainfall equivalent; loose debris slope; evolution

1 引 言

2008 年 1 月 12 日至 2 月初, 湖南、湖北、安徽、江西、贵州、广西等省区出现了 1954 年以来冬季最严重的大范围持续低温、雨雪、冰冻天气。在安徽中部、江苏南部积雪厚度达 30~45 cm, 湖南、湖北两省雨雪、冰冻天气是 1954 年以来持续时间最长、影响程度最严重的, 贵州 26 个县(市)的冻雨

天气持续时间也突破了历史记录。由于雨雪量大、积雪深、低温冰冻持续时间长, 对农业、交通、电力、通讯以及日常生活造成了严重影响, 同时突如其来的极端冰雪灾害引发了多起地质灾害。研究指出, 2008 年 1~3 月份全国地质灾害的发生受冰雪融化影响显著, 其中受此次极端冰雪气候影响的地区地质灾害与往年同期相比显著增多。但在后期气温回升时, 由于积雪融化成雪水未能达到暴雨级别,

收稿日期: 2010-05-07

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(No. 2008BAC47B01, No. 2008BAC47B04)。

第一作者简介: 缪海波, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性及地质灾害方面的研究工作。E-mail: mhb1985@126.com

因此,在融雪时期未出现强降水的情况下,融雪不会诱发大范围的山洪、泥石流和滑坡等山地灾害,而是多以小型的浅层滑坡为主,呈现出区域性强、规模小等特点^[1-2]。

冰雪融化引起的地质灾害屡见不鲜。瑞士阿尔卑斯山系已调查的体积大于 10^8 m^3 的特大型滑坡就有几十处,多数是由于第四系冰川后退时冰雪融化导致的岩体松动饱水引起的^[3]。2006 年 2~3 月在日本由于冰雪融化引发了大量滑坡灾害^[4]。2000 年我国西藏易贡滑坡就是由于雪峰冰雪融化引发山体崩滑并形成碎屑流,产生了巨大灾害^[5]。针对上述由于冰雪融化引发的地质灾害问题,国内外学者进行了大量的研究与探索。代表性工作有:对多年冻土地区的冻融泥流现象的描述,对冻土边坡失稳类型的划分,基于离心模型试验的冻土层融化过程中斜坡运动机制研究等等^[6-7]。我国学者根据三北高寒地区岩土体的赋存环境和地质灾害表现形式,研究了冰雪融化引发地质灾害类型划分与斜坡失稳机制^[8-10]。以上研究主要针对具有常年冻土的高寒地区,相比之下,南方极端冰雪条件下的短时冻土,无论是其深度、热融及冻融过程都不完全相同,对此类条件下地质灾害的类型、成因机制及影响因素研究鲜见文献。再者由于南方极端冰雪灾害气候的罕见性,其引发的地质灾害问题未能得到应有的重视,加之在地形、地质环境条件、气候环境等等与高寒地区存在极大的差异,因此,针对我国南方中低纬度地区极端冰雪灾害条件下引发的地质灾害类型及其影响机制的理论、试验及数值方面的研究基本为空白。

基于以上问题,本文对融雪触发地质灾害的一般规律进行了分析,并根据南方极端冰雪灾害气候的特点,建立了简化的有效融雪模型。以均质松散堆积体边坡为算例,应用加拿大岩土工程分析软件 GEOStudio 分别模拟计算了融雪时坡体的渗流场、整体稳定性及变形特征,综合计算成果探讨了极端冰雪灾害条件下松散堆积体边坡的发展演化特征。

2 融雪触发滑坡的一般规律

2.1 触发机制

滑坡的发生受其自身物质组成、所处地质环境以及外界诱发因素 3 个方面的综合控制。滑坡的物质组成与地质环境是固有的,并在一定时间段内是静止的,而外界诱发因素则是滑坡最为活跃的主导因素,如降雨、地震、人类工程活动以及库水位变动(对库岸滑坡)等。由于融雪与降雨在触发滑坡

灾害表现形式上的相似性,因此,本文分析融雪触发滑坡灾害一般规律时从入渗的角度分析两者的异同点。

针对降雨诱发滑坡灾害问题,国内外在降雨与滑坡发生的时空关系、前期降雨对斜坡的稳定性影响、雨水入渗对非饱和土参数及坡体稳定性影响等方面开展了大量研究工作,对其触发机制已有较为清晰的认识^[11-13]。强降雨作用下,当降雨强度达到该区域一定值就会产生滑坡群发现象,即降雨量阈值^[14-15]。对于单体滑坡,由于存在变形裂缝及岩体裂隙,在强降雨作用下坡体产生有压渗透,雨水入渗量大大增加,基质吸力大幅度降低,从而在较短时间内坡体稳定性急剧降低,随即产生滑动^[16]。同样地,在极端冰雪灾害气候下,经过反复冻融作用使得地表松散堆积体孔隙度增加,渗透系数增大,含水率增大,土质变得疏松,坡体的重度也相应增加,其力学性质也随着下降,坡体稳定性降低。降雨与融雪入渗的作用过程可用图 1 示意^[17]。

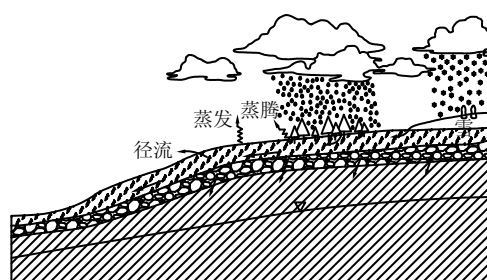


图 1 降雨与融雪入渗示意图

Fig.1 Schematic diagram of rainfall and snowmelt infiltration

冰雪融化对滑坡的作用机制与降雨类似,但又不完全不同,其两者诱发滑坡灾害的时间和规模也不相同。①由于冰雪融化所形成的雪水量远远未能达到强降雨级别,绝大部分入渗到地表松散堆积体中,径流较少(坡度较大的山坡和气温迅速升高情况下可能例外),不会对坡体形成冲刷,也不会对坡体内部形成较大的动水压力。②坡体岩土体在反复冻融作用下,其孔隙度的增大使得雪水可以充分入渗而软化滑坡体和滑动面,且由于昼夜温差,冰雪融化缓慢,在坡体表面不会产生有压渗透,从而入渗速度缓慢,因此,与降雨相比,其引起的坡体变形是浅层的、局部的、缓慢的。③在植被发育地区,长时间的冰雪覆盖导致了植被折断,使得植被的根固作用减弱,在增加坡体荷载的同时减弱了其阻滑力。因此,植被发育的山区在极端冰雪灾害条件下滑坡灾害的发生概率高于其在降雨条件下的发生概率。

2.2 典型事例分析

湖南省是受本次雨雪冰冻灾害最为严重且地质灾害频发的地区。通过对该地区典型地质灾害点实地调查发现, 极端冰雪灾害对规模较大的滑坡体以局部影响为主, 表现出冰雪融化对原有地质灾害的继承性, 且绝大部分的局部变形又出现在滑坡体上覆的松散堆积体上, 物质组成为残积或崩坡积成因的碎石土、古滑坡堆积成因的黏土和粉质黏土以及花岗岩的强风化层, 其中以郴州市王仙岭风景区的小王仙岭滑坡碎屑流最具代表性^[18]。

小王仙岭滑坡主滑方向为 295° , 坡体中部宽约 11.2 m , 后缘高程约 500 m , 滑体体积约 $5\,000\text{ m}^3$ 。坡体位于两侧山脊之间的沟谷中, 纵剖面为折线形, 中部略凸起, 上缓下陡。上部坡度约为 40° , 中坡度约为 $50^\circ\sim 55^\circ$, 下部约为 60° 。坡体物质组成为崩坡积物, 物质成分为粉质黏土夹碎块石, 碎块石岩性为中粒电气石花岗岩, 粒径 $3\sim 70\text{ m}$ 不等, 碎块石含量为 70% 。可见基岩出露, 岩性为中粒电气石花岗岩, 石英含量较高。滑动面为上覆崩坡积层与基岩接触面。

2008 年元旦之后, 王仙岭生态公园连续多日出现阴雨、冻雨、雨夹雪和大雪天气。尤其在 1 月 13 日之后, 气温骤降, 在连续 3 d 暴雪之后, 有持续 3 周的阴雨、大雪、超低温和冰冻等恶劣天气, 冰封时间到 2 月 15 日结束, 持续时间长达 41 d 之久。之后便受南方暖湿气流影响, 气温回升很快, 冰雪大量融化并伴有降雨出现, 从而为小王仙岭滑坡及泥石流的形成提供了十分重要的外部条件, 其全貌如图 2 所示。



图 2 小王仙岭滑坡泥石流全貌

Fig.2 Complete picture of Xiaowangxianling landslide-debris flow

极端冰雪灾害触发小王仙岭滑坡泥石流的过程为:

(1) 前期阴雨、冻雨的入渗提高了上覆松散堆

积体含水率, 由于昼夜温差而反复冻融, 孔隙不断增大, 结构进一步松散, 入渗能力更强。

(2) 连续 3 d 暴雪加之 3 周的阴雨、大雪、超低温和冰冻后, 坡体荷载急剧增大, 且植被由于覆盖的冰雪太厚而折断、倾倒, 植被的根固作用大大降低, 造成了坡体局部变形而产生裂缝 (见图 3)。



图 3 植被上覆冰雪情况

Fig.3 Picture of snow-covered vegetation

(3) 冰封结束后, 由于气温回升, 冰雪开始融化, 雪水沿着坡体孔隙、裂缝、植被根系松动圈等入渗, 坡体含水率逐渐增加, 土体自重也随着增加。随着融雪的持续, 一方面, 入渗的孔隙水在坡体内形成动水压力; 另一方面, 岩土体自身抗剪强度降低, 最终导致松散堆积体沿下伏基岩接触面发生滑动 (图 4)。



图 4 松散堆积体发生滑动

Fig.4 The sliding of loose debris

(4) 由于受南方暖湿气流影响, 持续的降雨使冰雪融化速度加快, 在滑坡体上产生积水与径流, 形成有压渗透并冲刷坡体, 大量的雪水与降雨带动滑坡体下滑, 形成滑坡泥石流 (见图 5)。

3 简化的有效融雪模型

当融雪条件满足时, 积雪开始融化, 这时重要的是要估计融雪强度或速率, 以及在一定时间段内的融雪量。融雪强度和融雪量决定于积雪的状态和融

雪的热量平衡条件。日本学者 Niwa 等^[19]于 1990 年在分析大坝渗流时建立了融雪径流模型,其后 Kazama 等^[20-21]对其进行了修正,建立的降雪与融雪联合的融雪模型 (snow water equivalent model),并被推广应用。本文借鉴其思想,建立了简化的有效融雪模型。



图 5 滑坡泥石流的形成

Fig.5 The formation of the landslide-debris flow

引入度日因子 a , 定义为每天气温上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所产生的融雪深度。采用经验公式进行确定^[22]:

$$a = 1.1 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1)$$

式中: a 为引入度日因子 ($\text{cm}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$); ρ_s 为雪密度; ρ_w 为水密度。积雪密度采用表 1 中的逐月均值^[23]。

表 1 逐月平均积雪密度

Table 1 Monthly average snow density

月份	11	12	1	2
积雪密度/(g/cm^3)	0.134	0.173	0.136	0.100

取 1 月份的平均积雪密度, 得出度日因子 a 为

$$a = 1.1 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} = 1.1 \times \frac{0.136}{1.000} = 0.1496 \text{ cm}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$$

引入雪雨当量 SRE (snowmelt rainfall equivalent), 定义为融雪期间雪融化成水的日降雨当量 (mm/d)。建立的有效融雪模型如图 6 所示。

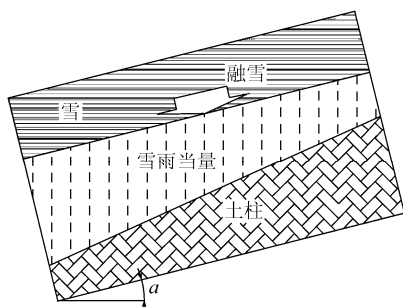


图 6 简化的有效融雪模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of simplified effective snowmelt model

根据融雪前后质量守恒, 得

$$aT\rho_s = SRE \cdot \rho_w \quad (2)$$

由此可得

$$SRE = aT \frac{\rho_s}{\rho_w} = 0.1496 \times \frac{0.136}{1.000} T \approx 0.02T \quad (3)$$

式中: T 为融雪期间温度 ($^{\circ}\text{C}$)。考虑到南方极端冰雪灾害条件的特点, 如积雪深度、日气温变化等因素, T 的取值范围定为 $0 \leq T \leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 均质松散堆积体边坡算例

应用加拿大岩土工程分析软件 GEOSTUDIO 中 SEEP/W 模块模拟计算冰雪融化时不同雨雪当量下松散堆积体边坡渗流场特征。在此基础上, 应用 SLOPE/W 模块中 Bishop 极限平衡分析法, 将 SEEP/W 模块中计算出来的暂态渗流场耦合到 SLOPE/W 模块中, 从而计算出各时刻的坡体整体稳定性系数。最后应用 SIGMA/W 模块分析不同雨雪当量下松散堆积体边坡变形位移特征。本文将松散堆积体边坡的上述 3 个方面的计算成果结合起来, 分析其在极端冰雪灾害条件下的演化特征。

4.1 渗流分析

根据小王仙岭滑坡泥石流的工程地质概况, 考虑其在极端冰雪灾害条件下仅表层松散堆积体发生失稳破坏, 加之没有实测剖面, 因此, 本文针对此类物质组成的滑坡现象设计了一均质松散堆积体边坡作为概化模型。坡体的物质组成为残坡积土, 物质成分为粉质黏土夹碎块石, 其数值模型如图 7 所示。根据小王仙岭滑坡体上红色粉质黏土的室内试验成果, 计算参数见表 2。渗流场模拟计算的边界条件为: 模型左侧为定流量边界, 右侧为定水头边界, 底部为 0 流量边界, 坡体表面为融雪入渗边界。在进行模拟计算之前坡体非饱和区的初始渗流场是模拟结果合理与否的前提, 初始渗流场模拟应该使得坡体非饱和区的基质吸力 (即负孔隙水压力) 达到预期的分布。许多学者和研究机构对土体的基质吸力进行过现场量测, 认为在天然条件下一般黏性土基质吸力的数量级为十 (单位: kPa)^[24]。本文模拟的松散堆积体边坡主要物质成分为粉质黏土, 因此, 坡体初始渗流场中基质吸力也调整在这一范围内, 如图 8 所示。

本次模拟计算时选取 6 种雪雨当量, 见表 3。融雪过程历时 15 d, 考虑到昼夜温差, 简化为每天 12 h 融雪, 12 h 不融雪。

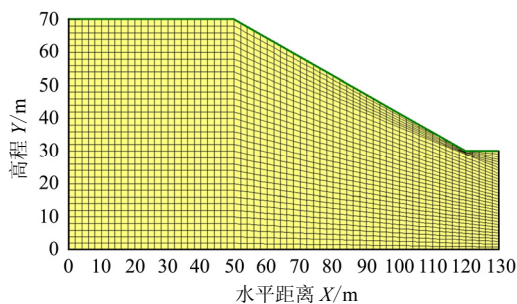


图 7 均质松散堆积体边坡数值模型
Fig.7 Numerical model of homogeneous loose debris landslide

表 2 渗流场模拟参数表

Table 2 Parameters of seepage simulation

天然重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	饱和渗透 系数/(m/s)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	饱和体积 含水率/%	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν
19.4	2.27×10^{-6}	25.0	19.0	32.4	4.235×10^5	0.37

注：温度范围为 0~15℃，边坡土体不存在冻融效应，故参数选用小王仙岭滑坡室内常规试验值。

表 3 渗流场模拟时雪雨当量

Table 3 Snow rainfall equivalents of seepage simulation

工况	$T/^\circ\text{C}$	雪雨当量 /(mm/d)	工况	$T/^\circ\text{C}$	雪雨当量 /(mm/d)
1	0	0.0	4	9	1.8
2	3	0.6	5	12	2.4
3	6	1.2	6	15	3.0

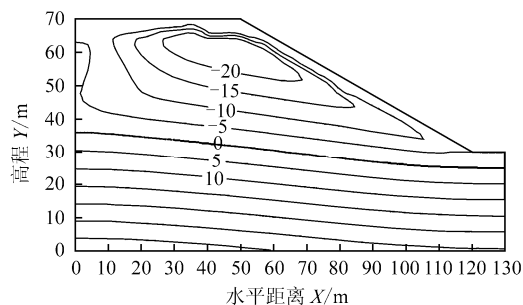


图 8 天然状态下初始孔隙水压力分布 (单位: kPa)
Fig.8 Initial pore water pressure in the natural state (unit: kPa)

分别考察在不同雪雨当量下松散堆积体边坡渗流场及非饱和区基质吸力的变化。图 9 为 SRE 分别为 0、0.6、1.2、1.8、2.4、3 mm/d 时，经过 15 d 融雪完成之后坡面上孔隙水压力分布图（负孔隙水压力即基质吸力）。图 10 为 $SRE = 3 \text{ mm/d}$ 时地下水位线随融雪时间的变化关系。

从图 9 中可以看出， SRE 分别为 0.6、1.2、1.8、2.4、3 mm/d 时，经过 15 d 的融雪之后坡体的渗流场是相同的，即每天融雪时坡体的渗流场没有变化。坡体前缘至中部，基质吸力逐渐减小，直至饱和，而后缘则无明显变化，但比不融雪时基质吸力有所

减小，图 10 也说明了这一点。

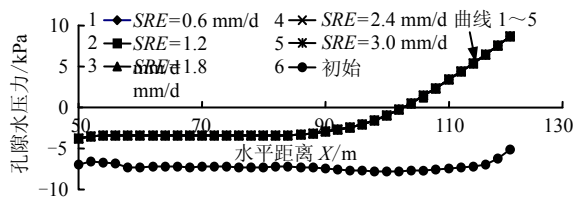


图 9 15 d 融雪后坡面孔隙水压力分布图
Fig.9 Pore water pressures on the slope surface after 15-day's snowmelt

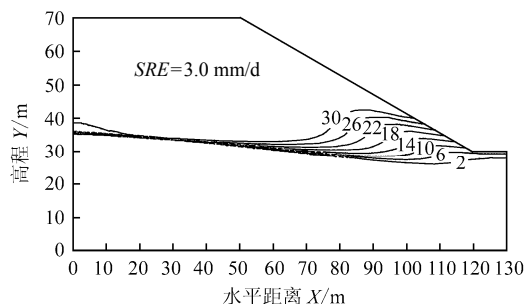


图 10 地下水位线随融雪时间变化关系图 (单位: 0.5 d)
Fig.10 Underground water levels vs. snowmelt time (unit: 0.5 d)

当雪雨当量 $SRE = 3 \text{ mm/d}$ 时，在水平距离 100 m 处自坡体表面向下 1 m（节点 1 834），5 m（节点 1 829）和 10 m（节点 1 825）处分别设观测点，在整个融雪过程中其基质吸力与融雪时间之间的关系如图 11 所示。

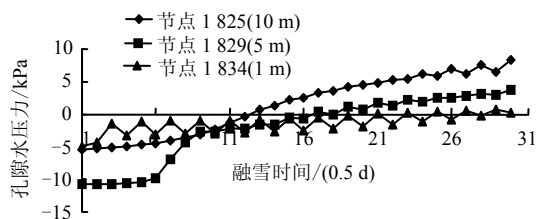


图 11 15 d 融雪后基质吸力与融雪时间的关系
Fig.11 Matric suction vs. snowmelt time after 15 day's snowmelt

从图 11 中可以看出，基质吸力的减小在近地表处（地下 1 m）表现不明显，在融雪 3~4 d 后，地下 5 m 和 10 m 处基质吸力才有明显减小，说明坡体非饱和区随着融雪的持续在不断地消失而逐渐呈饱和状态。

4.2 稳定性分析

将 SEEP/W 模块中计算得到的暂态渗流场耦合到 SLOPE/W 模块中，应用简化 Bishop 极限平衡法计算坡体的整体稳定性。

由渗流场模拟结果可知,在融雪时各试算的雪雨当量下该松散堆积体边坡渗流场相同,因此,其对坡体的稳定性亦是相同的。此处仅计算 $SRE = 3 \text{ mm/d}$ 时的坡体整体稳定性随融雪时间的关系,其结果如图 12 所示。

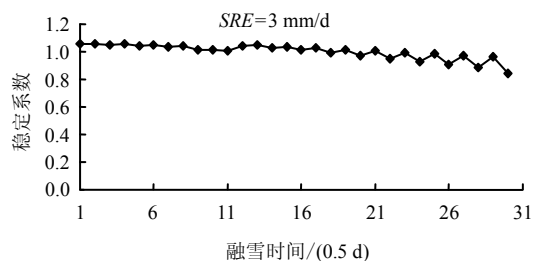


图 12 坡体整体稳定性与融雪时间的关系

Fig.12 Whole stability of slope vs. snowmelt time

从图可以看出,随着融雪的持续,松散堆积体边坡的稳定性逐渐下降,并且稳定系数的下降具有滞后性,表现为融雪停止的 12 h 大幅度下降。

4.3 变形分析

同稳定性计算,此处应用 SIGMA/W 模块模拟计算 $SRE = 0$ (即不融雪) 和 $SRE = 3 \text{ mm/d}$ 时坡体的变形位移,采用理想弹塑性本构模型。天然状态下,不融雪时松散堆积体边坡表面水平位移如图 13 所示,坡面上水平位移、竖向位移与融雪时间的关系分别如图 14、15 所示。

图 13 表明,在天然状态下坡面水平位移由后缘至前缘逐渐增大,在坡脚附近达到最大,而竖向位移则刚好相反,这与坡体的实际状态是相吻合的。图 14(a)、(b)说明,随着融雪的持续,坡面处水平位移逐渐增大,且前缘变形大于后缘。图 15(a)、(b)说明随着融雪的持续,坡面竖向位移逐渐增大,且在后缘表现出下错,而在前缘表现出隆起。图 14、15 与图 12 共同说明,约在融雪 9 d 之后,水平位移与竖向位移急剧增大到几米,坡体出现整体失稳。

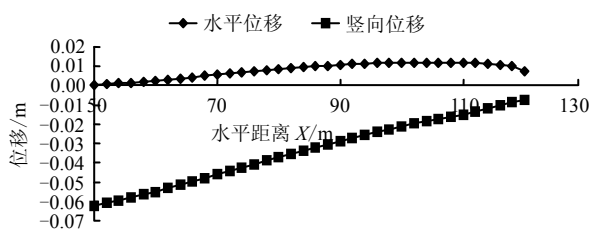
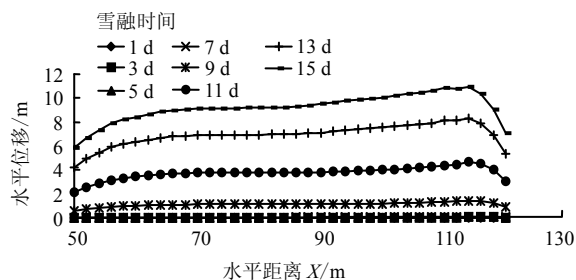
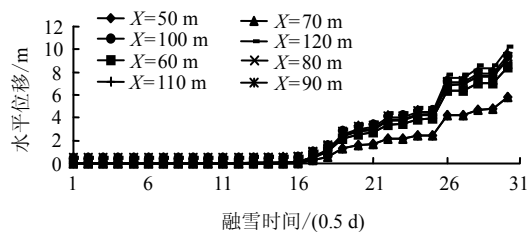


图 13 天然状态下坡面水平位移和竖向位移

Fig.13 Horizontal and vertical displacements of slope surface in the natural state



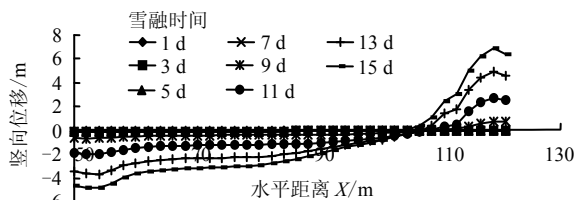
(a) 不同融雪时间下坡面水平位移



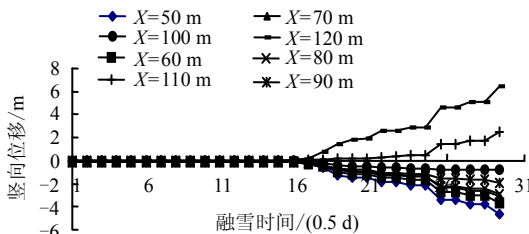
(b) 不同水平距离处坡面水平位移

图 14 坡面水平位移与融雪时间的关系

Fig.14 Relationships between the horizontal displacement of slope surface and snowmelt time



(a) 不同融雪时间下坡面竖向位移



(b) 不同水平距离处坡面竖向位移

图 15 坡面竖向位移与融雪时间的关系

Fig.15 Relationships between vertical displacement of the slope surface and snowmelt time

5 结论

(1) 极端冰雪灾害条件下,融雪触发滑坡灾害规律与强降雨类似,但又不完全相同,两者诱发滑坡灾害的时间和规模也不一样。首先,融雪量达不到强降雨级别,不会产生大量积水与快速径流,不会形成有压渗透和冲刷地表;其次,由于昼夜温差,冰雪融化缓慢,从而入渗也很缓慢,但岩土体在反复冻融作用下,其孔隙度的增大使得雪水可以充分入渗而软化滑坡体和滑动面。与强降雨相比,其引

起的坡体变形是浅层的、局部的、缓慢的;再者,长时间的冰雪覆盖导致了植被折断,使得植被的根固作用减弱,在增加坡体荷载的同时减弱了其阻滑力,因此,植被发育的山区在极端冰雪灾害条件下滑坡灾害的发生概率高于其在降雨条件下的发生概率。

(2) 冰雪融化时,一定的融雪速率与融雪量对松散堆积体边坡渗流场无影响。融雪时,基质吸力的减小在近地表处表现不明显;在融雪一段时间后,坡体深部基质吸力才有明显减小,说明坡体非饱和区随着融雪的持续不断地消失而逐渐呈饱和状态。

(3) 一定的融雪速率与融雪量下松散堆积体边坡整体稳定性随融雪持续在不断降低,并且稳定系数的下降具有滞后性,表现为融雪停止后一段时间内大幅度下降。

(4) 随着融雪的持续,坡面上水平位移与竖向位移逐渐增大。在水平方向上前缘变形大于后缘,而竖直方向上后缘表现出下错,前缘表现出隆起。在融雪持续一段时间后,坡体失稳破坏。

参考文献

- [1] 殷志强. 2008年春季极端天气气候事件对地质灾害的影响[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10(2): 20—24.
YIN Zhi-qiang. Influence on geological disasters of the extreme climate event of spring 2008 in China[J]. **Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology**, 2008, 10(2): 20—24.
- [2] 韦方强, 赵琳娜, 江玉红, 等. 2008年初南方雨雪冰冻灾害及其对山地灾害的影响[J]. 山地学报, 2008, 26(2): 253—254.
WEI Fang-qiang, ZHAO Lin-na, JIANG Yu-hong, et al. The disaster of snow storm and frozen rain and its influence on mountain hazards[J]. **Journal of Mountain Science**, 2008, 26(2): 253—254.
- [3] 殷坤龙. 瑞士滑坡及其研究概况[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(4): 104—107.
YIN Kun-long. Landslides in Switzerland and its research overview[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 1999, 10(4): 104—107.
- [4] SATO ATSUSHI. Heavy snowfall disaster in the winter of 2005—2006[J]. **Journal of Japan Natural Disaster Science**, 2006, 25(1): 71—78.
- [5] 刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(3): 9—18.
LIU Wei. Study on the characteristics of huge scale-super high speed-long distance landslide Chain in Yigong, Tibet[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2002, 13(3): 9—18.
- [6] MCROBERTS E C, MORGENSTERN N R. The stability of thawing slopes[J]. **Canadian Geotechnical**, 1974, 11(5): 447—469.
- [7] CHARLES HARRIS. Engineering properties, groundwater conditions, and the nature of soil movement on a solifluction slope in North Norway[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 1977, 10(1): 27—43.
- [8] 吴玮江. 季节性冻结滞水促滑效应——滑坡发育的一种新因素[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 359—365.
WU Wei-jiang. Slide accelerated by water entrapment due to seasonal freezing[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1997, 19(4): 359—365.
- [9] 牛富俊, 陈国栋, 赖远明, 等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 402—406.
NIU Fu-jun, CHEN Guo-dong, LAI Yuan-ming, et al. Instability study on thaw slumping in permafrost regions of Qinghai-Tibet plateau[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 402—406.
- [10] 陈玉超. 冻融环境下岩土边坡稳定性初探[硕士学位论文D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- [11] CANUTI P, FOCARDI P, GARZONIO C A. Correlation between rainfall and landslides[J]. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, 1985, (32): 49—54.
- [12] RAHARDJO H, LI X W, TOLL D G, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2001, 19(3—4): 371—399.
- [13] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响和参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1—13.
WU Hong-wei, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effects of rainfall infiltration on unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(1): 1—13.
- [14] 谢剑明, 刘礼领, 殷坤龙, 等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阈值研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 101—105.
XIE Jian-ming, LIU Li-ling, YIN Kun-long, et al. Study on the threshold valves of rainfall of landslide hazards for early-warning and prediction in Zhejiang province[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2003, 22(4): 101—105.

- [3] PAVLAKOVIC B N. Leaky guided ultrasonic waves in NDT[D]. London: Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 1998.
- [4] DUAL JURG, HAGELI M, PFAFFINGER M R, et al. Experimental aspects of quantitative nondestructive evaluation using guided waves[J]. **Ultrasonics**, 1996, 34: 291—295.
- [5] LIKINS G E, RAUSCHE F. Recent advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing[C]//Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles. St. Paul: CRC Press, 2000: 211—218.
- [6] MASSOUDI N, TEFFERA W. Non-destructive testing of piles using the low strain integrity method[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. New York: [s. n.], 2004: 13—17.
- [7] 陈凡, 罗文章. 预应力管桩低应变反射波法检测时的尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 353—356.
- CHEN Fan, LUO Wen-zhang. Dimension effect on low strain integrity testing of prestressed pipe piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 353—356.
- [8] 黄大治, 陈龙珠. 钢筋混凝土管桩反射波法的三维有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 803—808.
- HUANG Da-zhi, CHEN Long-zhu. 3D finite element analysis of reflected waves in concrete pipe pile with defects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 803—808.
- [9] 费康, 刘汉龙, 张霆. PCC 桩低应变检测中的三维效应[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1095—1102.
- FEI Kang, LIU Han-long, ZHANG Ting. Three-dimensional effects in low strain integrity test of PCC pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1095—1102.
- [10] CHOW Y K, PHOON K K, CHOW W F, et al. Low strain integrity testing of piles: Three-dimensional effects[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(11): 1057—1062.
- [11] 丁选明. PCC 桩纵向振动响应试验与解析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [12] 丁选明, 刘汉龙. 低应变下变阻抗薄壁管桩动力响应频域解析解[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1793—1798.
- DING Xuan-ming, LIU Han-long. Analytical solution in frequency domain of dynamic response of thin-wall pipe piles with variable wave impedance under low strain transient concentrated load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1793—1798.

上接第 153 页

- [15] 高华喜, 殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1055—1060.
- GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prevention[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1061—1066.
- [16] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1061—1066.
- LIU Li-ling, YIN Kun-long. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1061—1066.
- [17] KRAHN JOHN. Seepage modeling with SEEP/W—An engineering methodology[M]. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., 2004.
- [18] 邢林啸. 湖南省极端冰雪灾害条件下地质灾害特征研究[学士学位论文 D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- [19] NIWA K, MORITANI A. Model of snowmelt runoff for prediction of dam Inflow[R]. Tokyo: Institute of Construction Ministry, 1990: 121—129.
- [20] KAZAMA S, IZUMI H, SARUKKALIGE P R, et al. Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources[J]. **Hydrological Processes**, 2008, 22(13): 2315—2324.
- [21] KAWAGOE S, KAZAMA S, SARUKKALIGE P R. Assessment of snowmelt triggered landslide hazard and risk in Japan[J]. **Cold Regions Sciences and Technology**, 2009, 58(3): 120—129.
- [22] MARTINEC J, RANGO A, ROBERTS R, et al. Snowmelt runoff model (SRM) user's manual (Updated Edition 2008, Windows Version 1.11)[M]. Las Cruces: New Mexico State University, USA, 2008.
- [23] 陈乾, 陈添宇. 祁连山区季节性积雪资源的气候分析[J]. 地理研究, 1991, 10(1): 24—38.
- CHEN Qian, CHEN Tian-yu. Climatological analysis of seasonal snow resources in Qilian Mt.[J]. **Geographical Research**, 1991, 10(1): 24—38.
- [24] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.