

高速远程滑坡超前冲击气浪动力学机理

程谦恭, 王玉峰, 朱圻, 王宏丹

(西南交通大学地质工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 超前冲击气浪是高速滑体运动过程中强烈推挤压缩周围的空气所产生。它具有强大的破坏能力, 在运动路径上, 对滑体前方的建筑物及人民生命财产常造成毁灭性灾难。以典型高速滑坡为原型, 运用空气动力学理论, 采用计算流体力学软件, 建立了二维粘性、不可压缩、定常流模型, 再现仿真了高速滑坡超前冲击气浪产生流场的特征, 分析了其形成的动力学机理。结果表明: 滑坡高速下滑中产生的超前冲击气浪压力与滑体的形态密切相关。滑体前部、尾部壁面倾角越大, 滑坡外流场冲击气压越大。直立壁面滑坡体在前方 500 m 以内产生的冲击气浪压力相当于 11~12 级风力的破坏能力; 翼型滑坡体产生的气浪压力最小, 前方 100 m 以外对建筑物的破坏能力已较小, 相当于 6 级风力。从而得出超前冲击气浪潜在威胁的范围和破坏作用的强度, 为超前气浪灾害的防治提供了科学依据。

关键词: 冲击气浪; 动力学; 碎屑流; 数值模拟

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

超前冲击气浪 (airblast; wind gust), 是高速远程崩滑体 (rock avalanche) 亦即碎屑流 (sturzstrom; rock fragment flow), 在其运动前方产生的重要的动力学现象, 是高速崩滑体产生巨大冲击破坏力的主要原因。它推倒房屋, 折断树木, 碾轧地面上的人群或像秋风扫落叶般将人抛向空中。这种现象在国内外许多岩崩或岩滑现场均有出现^[1-15] (表 1)。2008-05-12 汶川地震过程中, 在强震作用下, 也产生了许多高速滑坡超前冲击气浪破坏现象, 其中北川王家岩滑坡就是一典型实例 (图 1)。

高速崩滑体由于体积巨大, 速度高, 因此动量很大, 在运动过程中瞬间压缩前方空气, 形成陡立的波阵面, 特别是当其前方存在刚性壁面的障碍物时, 压缩作用更加剧烈。这种强烈的空气冲击波常常对崩滑体运动前方的建筑物及人民生命财产造成毁灭性灾难, 故对其动力学机理的研究具有重要意义。然而, 目前国内外有关崩滑超前气浪的文献^[8,12-13], 主要关注于冲击气浪灾害现象的描述,



图 1 北川王家岩滑坡气浪影响区

Fig. 1 The view of air-blast impacted zone of Wangjiayan Landslide

对其动力学机理的研究尚未涉及。本文采用计算流体力学软件, 对不同滑体超前冲击气浪产生的流场进行数值模拟, 分析对比高速滑体运动前方冲击气浪的产生及其变化规律, 特别是对其潜在威胁的范围、冲击力大小以及破坏作用强度等进行分析, 为超前气浪灾害的防治提供科学依据。

收稿日期 (Received date): 2010-08-10; 改回日期 (Accepted): 2010-10-31。

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2008CB425801)、国家自然科学基金 (40172093)。[National Basic Research Program of China (973 Program) No. 2008CB425801 (2008-2010); National Nature Science Foundation (No. 40172093).]

作者简介 (Biography): 程谦恭 (1962-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 博导, 主要从事高速崩滑动力学机理的研究。[Cheng Qiangong (1962-), male, professor, engaged in the research of dynamics of rock avalanches.] E-mail: chengqiangong@home.swjtu.edu

表1 崩塌体特征和超前冲击气浪效应
Table 1 Rock avalanches characteristics and airblast effects

| 崩塌体 (发生时间) | 体积 /10 ⁶ m ³ | 垂直落差 /m | 水平远程 /m | 最大速度 /m·s ⁻¹ | 气浪效应 |
|------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|----------------------------|--|
| 瑞士埃尔姆岩崩 (1881年) | 10 | 570 | 1 500 | 50~100 | 许多人被气浪抛向空中,坚固的木房整体凌空飞起,撞击地面后变得粉碎;碎屑流前方4 km处大树弯腰,房屋窗户啪啪作响 ^[1] |
| 美国麦迪森坎阳岩滑 (1959年) | 20 | 200 | 600 | 50 | 河床堆积物和鱼被抛上滑坡碎屑物前方300 m远的河对岸;汽车在空中翻滚,2人被吹走 ^[2] |
| 意大利瓦依昂滑坡 (1963年) | 270 | 650 | 400 | 25 | 巨大的冲击波和随之而来的负压波,破坏了坝内所有观测设施,左岸地下厂房遭受严重破坏,厂房内的行车钢梁被扭曲剪断,廊道内加销的安全钢门被推出达12 m远;在库区右岸高出水库259 m的凯索村,一阵极为强烈的风震撼房屋,冲开门窗、掀起屋顶,水和石块飞入住房的二楼 ^[3] |
| 美国小托荷马岩崩 (1963年) | 11 | 1 900 | 7 000 | 38 | 房屋被吹走100 m远,摔得粉碎;大片树木树枝折断,向沟谷上游侧的树皮被削掉;部分直立的树干裂成碎片,块石嵌入其中 ^[4] |
| 云南禄劝滑坡 (1965年) | 200 | 1 800 | 8 000 | >50 | 冲毁多处山嘴,切削了坡脚;投射的飞石,将基岩磨成新鲜光滑、擦痕累累的磨光面 ^[5] |
| 秘鲁来瓦斯多-华 斯卡兰崩塌(1970 年) | 50~100 | 4 000 | 16 000 | 75~100; 319 | 一些碎屑被加速到1 150 km/h的速度,重达数吨的块石在空中抛掷远达4 km;具有显著的超前岩块冲击和泥浆飞溅区,岩块被发射以弹道轨迹的方式飞行,呈15~30°的低角度甚至水平状态撞击地面,形成椭圆形的冲击坑;人群抛向空中、楼房推倒、树木折断、地面冲蚀等现象非常普遍 ^[6] |
| 湖北盐池河岩崩 (1980年) | 1.3 | 400 | 550 | 43 | 前方高层建筑被巨大冲击气浪剪断后抛向河岸陡壁;岩块和破碎的建筑物,高速自下而上撞击对岸陡壁后产生回弹和折射 ^[7] |
| 陕西石家坡滑坡 (1981年) | 0.48 | 200 | 1 060 | 28 | 地面冲秃,树皮剥脱,枝叶击落,林木折断等 ^[8] |
| 四川溪口滑坡 (1989年) | 1 | 520 | 1 500 | >25 | 飞瀑般倾泄的“石雨”,顿时将山包削去约三分之一,形成一个半月形的撞击面;两侧谷坡上,可见到被气流吹倒及被土石压弯的树木;汽车被压扁和翻滚 ^[9] |
| 云南头寨沟滑坡 (1991年) | 16 | 960 | 3 600 | 56 | 碎屑物质被气流裹挟两次翻越山脊,越岭高度达60~100 m,并在山脊背面抛撒堆积;一幸存男村民瞬间被气浪冲倒;植物普遍顺向倒伏,树木定向折断,沿边缘有定向抛撒碎屑物,其方向与植物倒伏方向一致 ^[10] |
| 美国约斯曼特岩崩 (1996年) | 0.03 | 550 | 480 | 110~120 | 块体与地面撞击形成的空气压力波导致了速度可与龙卷风或飓风相比的气浪,将撞击点350~500 m半径范围内约1 000棵树连根拔起或折断;尾随其后的砂质密云,磨蚀了落下的树干和残留的直立树木 ^[11,12] |
| 台湾草岭滑坡 (1999年) | 120 | 800 | 4 000 | >25 | 坡面被剥皮,许多树木顺向倒卧,另有许多树木之树梢及树叶被削除,树木被齐头式剪断 ^[13] |
| 西藏易贡岩崩 (2000年) | 300 | 3 000 | 7 000 | >39 | 树木被连根拔起,依山体坡势就地卧倒,规律排列,倒地方向与冲击波方向一致,少数被搬运至数米乃至数百米以外的地方;直径1 m的树木被拦腰折断,仅留有几十厘米至数米高的残桩,有的树桩甚至被击成碎片状 ^[14] |
| 北川县王家岩滑坡 (2008年) | 1.4 | 320 | 700 | >20 | 滑坡堆积区周边建筑物总体上向堆积区外侧定向倒塌,区内房屋毁坏程度明显高于其他地段,基本被彻底夷为废墟 ^[15] |
| 青川县东河口滑坡 (2008年) | 15 | 700 | 2 450 | >20 | 滑体高速下滑,冲入前沿的红石河,并在对岸爬高70 m,然后顺青竹江继续滑行近1.5 km,滑体摧毁东河口村4个社、邻近的关庄镇沙坝社区的1个社以及东河口电站,约260户700人被全部掩埋,其中一女孩被滑坡气浪推出1 km远 ^[15] |

1 高速滑坡运动路径与气浪产生条件

1.1 高速滑坡产生超前气浪的几种运动形式

据国内外数百起典型灾难性滑坡事件的分析,高速崩滑体的运动形式常表现为崩落(滑动)、飞行、滑流或流动等,其运动区可以分为^[16]:崩塌(滑坡)发生区、崩塌下落区(滑坡滑动区)、冲撞折射区、碎屑流动区、仰冲爬高区、越岭冲埋区、飞石溅落区、气浪冲击区、碎屑流堆积区等。在以上各阶段中,与超前气浪密切相关的有下面几种运动形式。

1. 空中整体飞行运动

许多高速滑坡在启动启程阶段获得迅猛的初速度,冲出剪出口后,由于剪出口略往上翘,往往呈凌空飞越状态;或者高速岩崩体自由落体撞击地面后,迸射出的碎屑流呈弹道抛掷状态。此时,冲击气浪作用范围主要出现在飞行滑体的前方。

2. 坡面滑动式解体碎屑流动

在较平直的山坡上,当滑体沿整个滑面滑到山坡下方,或者在较陡的山坡上,当滑体沿圆弧形滑面冲出剪出口后,由于前方地形相对开阔平坦,无障碍物出现,碎屑流堆积物铺洒在平面上呈“舌”形或扇形分布。此时,冲击气浪的作用范围也呈扇形,主要出现在滑体正前方及其两侧,并且正前方的气浪范围可以“超出”碎屑流堆积物前缘很远处。

3. 斜坡冲击碰撞式解体碎屑流动

几乎所有的碎屑流,都是高速岩崩或高速岩滑在运动过程中,通过碰撞作用,如高空俯冲碰撞、平面折射碰撞、低空仰冲碰撞等方式,与运动路径前方或两侧的突出阻挡山体发生强烈冲击碰撞而形成。由于碰撞方式不同,特别是当滑体或碎屑流与前方阻挡山体的坡面之间形成的入射角(垂直、锐夹角指向下游或上游)不同,以及面向滑体或碎屑流的斜坡坡面倾角(直立陡壁、陡倾或缓倾)不同,其碰撞后的碎屑流及其气浪作用范围可分成几部分:可以冲向对岸,进一步爬高,甚至翻越对面山坡;可以折射后冲向下游,或上游,或二者同时出现;或可以折射后向后返回;以上几种方式也可同时出现。

4. 多级冲程沟谷冲撞折射式碎屑流动

从崩滑体远程运动状态来看,最典型者莫过于多级冲程沟谷冲撞折射式碎屑流运动形式。由于气浪以及碎屑尘云作用范围高出碎屑流前面的“龙头”,在其运动路径两侧一定高度范围内,出现冲击

气浪过境留下的最高打击线。

1.2 气浪产生的条件

气浪产生的必要条件是,首先崩滑体必须具有较高的速度和巨大的体积。崩滑体速度越大,运行中可以快速推挤前方的空气形成高速气流。气压枪实验表明,30 m/s 的风速足以将木头碎片插入软木中,而更高的速度可将木头碎片插入硬木或者插入软木深度 $>1\text{ cm}$ ^[17]。风洞实验表明,能够吹翻汽车的风速为 50 m/s^[18]。而 120 ~ 130 m/s 的风速可以使房屋漂浮在空中或者将大树连根拔起^[12]。崩滑体体积越大,其运动中形成的“前锋”也越高,推挤的空气也愈多。据目击者描述,在瑞士埃尔姆岩滑,“碎石体沿着谷底像洪水泛滥一样快速推进。流体的前部稍高于尾部,头部圆而隆起,碎屑体呈波状运动”^[1]。秘鲁来瓦多斯-瓦斯卡兰山碎屑体的运动像波一样翻滚,波峰有 10 层楼房高^[6];瑞士戈尔道岩滑,解体后的碎屑流瞬间冲到谷底,激起了一道由泥、树木和水组成的立波,高达 20 m^[19];意大利瓦尔波尔滑坡,碎屑流的前锋像一堵泥和碎屑物质组成的墙,最大高度为 35 m^[20]。

其次,气浪冲击力的大小还受运动路径的地形条件所控制。当滑坡体呈凌空飞越或岩崩体撞击形成的碎屑流呈弹道抛射状态,遇到沟谷急转弯或陡崖时,伴随运动中的尘云和气浪受到急剧压缩,破坏力最大。对于沟谷冲撞折射式碎屑流动,因沟谷多变向,使碎屑流在运动过程中,时东时西,转动向前;其气浪随地形的起伏或从陡坎下飞扬起来,或从陡坎上倾泻而下,时起时伏形成尘云,碎屑流如炮弹在炮筒中运动,速度快,气浪大,破坏力强。

2 超前冲击气浪二维数值模拟

2.1 模拟软件简介

本文选用计算流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟软件,分析高速滑体超前气浪形成机理。该软件是专门用来进行流场分析、流场计算、流场预测的软件^[21]。CFD 的基本思路可以归结为:把原来在时间域和空间域上连续的物理量的场,用一系列有限个离散点上变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似值。针对此次模拟中,所研究对象的性质,模拟软件所用流体动力学控制方程为三

大守恒定律,即根据流体的连续性假设,从三大守恒定律出发导出描述质点运动的数学表达式。

2.2 问题的描述

前已述及,高速远程滑坡的运动可以分为9个不同的阶段。本文仅描述滑坡在滑动阶段沿滑面高速俯冲到地面上时,其超前气浪的特征,故不考虑滑体在远程运动过程中本身的结构和形状的变化^[22]以及周围地形地貌条件对冲击气浪的影响。模拟采用的典型滑坡地质模型^[23]为:常温下,速度为50.4 m/s的滑坡体沿倾角为23°的滑床高速下滑,下滑过程中在其正前方及两侧产生超前冲击气流场。取滑体的长度为110 m,高为12 m(由于是二维数值模拟,不考虑滑体的宽度),求解高速滑坡超前冲击气流场在其前方500 m范围内速度场和压力场的分布情况及其破坏能力。为计算简便,滑体运动时的顶、底面形状均取为直线形。模拟中用到的流体的属性和边界条件均使用国际单位。滑坡模拟简化模型如图2所示。

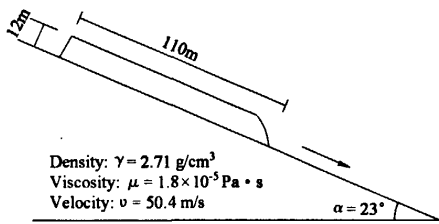


图2 高速滑坡体滑动阶段简化模型
Fig.2 Simplified model of landslide on slip surface

为有效地分析高速滑体几何形状对超前冲击气浪影响范围及其外流场特征的影响,本文采用三种滑体几何模型(图3)分别讨论滑体不同形态对超前冲击气浪的影响。

模型1:滑体前缘壁面为翼型,尾部壁面直立;模型2:滑体前缘壁面为翼型,尾部壁面亦采用翼型;模型3:滑体前缘壁面直立,尾部壁面为翼型。通过模型1与模型2对比,可分析当滑体前缘形态相同时,尾部壁面对气浪外流场的影响;模型3与模型2对比,可分析当滑体尾部形态相同时,前缘壁面对气浪外流场的影响。

同时,为进一步分析超前冲击气浪外流场中压力场的变化情况,每种模型在滑体运动前方不同距离处选取 P_0 、 P_1 两个典型剖面,提取该处压力数值,用于对比分析气浪引起的压力变化,见图4所示。 P_0

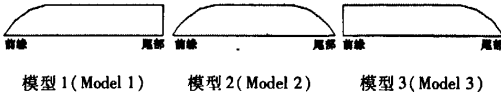


图3 不同模型的滑坡体形状
Fig.3 Simplified models with different shapes

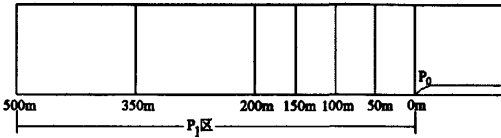


图4 剖面位置示意图
Fig.4 Sketch map presenting the site of profiles

为滑体前缘处, P_1 为滑体前方0~500 m范围。

2.3 模型参数的选定

设计算区域前、后边界面距离滑坡体500 m,上边界面距离滑体100 m(图5)。考虑到滑体的不规则性和计算方便,划分网格时采用由三角形与四边形组成的混合型非结构网格。

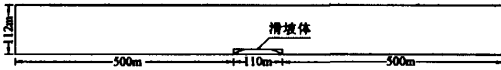


图5 计算区域
Fig.5 Schematic diagram of computational domain

模拟采用常温状态下粘性、不可压缩、湍流流动作为模拟情况,并采用标准 $\kappa-\epsilon$ 两方程模型进行计算求解。边界条件的选定见表2,其中地面为壁面边界,滑体上方端面为压力边界,滑体前方远端面为入口边界,滑体后方远端面为出口边界。通过计算,确定入口边界给定湍流动能 κ 和湍流耗散度 ϵ 分别为0.024和0.01。

数值模拟中,高速滑坡运动过程中产生超前冲击气浪的气体的物理属性参数赋值,见表3。流体名称为air。物理参数的赋值是依据空气在一个标准大气压、海平面高度、常温时的特征^[24]而确定。

表2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

| 边界类型 | 参数名称 | 数值 | 单位 |
|------|--------|------|-------------------|
| 入口边界 | 速度 V | 50.4 | m/s |
| 出口边界 | 流量 Q | 122 | kg/m ² |
| 壁面边界 | 速度 V | 50.4 | m/s |
| 压力边界 | 压力 P | 0 | Pa |

表 3 物理属性参数赋值

Table 3 Parameters of physical properties

| 材料 类型 | 名称 (Density) | 密度 (Density) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 定压比热 C_p (Thermal Conductivity) / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 导热性 (Thermal Conductivity) / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 粘度 (Viscosity) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|----------|-----------------|--|--|--|--|
| | | | | | |
| 流体 | 空气 | 1.225 | 1006.43 | 0.0242 | 1.7894×10^{-5} |

在模型初始化参数的确定中,采用进口速度值进行了直接初始化流场变量的方法。计算的收敛条件参数设置详见表 4 所示。

表 4 计算收敛条件

Table 4 Convergence conditions

| 迭代 次数 | 收敛标准 | | | | |
|----------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------|----------|
| | 连续性 Continuity | X 向速度 X-velocity | Y 向速度 Y-velocity | 能量 Energy | 湍流 动能 |
| 1 000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 10^{-6} | 0.001 |

3 模型计算结果分析与讨论

3.1 模型 1 滑体引起的冲击气浪流场计算结果

图 6 为滑体前方 60 m 范围内的速度等值线图。由图可知,在滑体前缘上方出现空气速度的最大值,约为 70.1 m/s。滑体前端速度等值线分布较密集,随着与滑体距离的增加,速度等值线逐渐稀疏,说明滑体周边的空气由于受到快速挤压,来不及扩散,聚集在滑体前缘形成强度较大的冲击气浪。

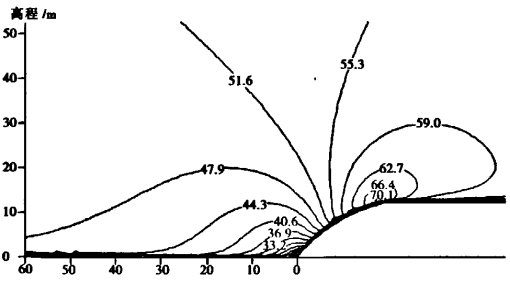


图 6 模型 1 速度等值线图/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 6 Velocity contour map of model 1

图 7 为滑体前方 250 m 范围内空气压力变化情况。由图可知:最大压力值出现在滑体前缘与地面相交处,约为 1 618 Pa。压力等值线呈不等间距分布,滑体前方均为正压区,而滑体上方则出现小面积

的负压区,最大负压值约为 -1 543 Pa。这是因为流向上方的一部分气流在流经滑体前端上缘时,由于缘角半径比较小,空气流速比较大,气流往往来不及转折,而出现局部分离,因此在上缘附近有很大的吸力峰,出现负压区。随着滑体上方外形平缓,流经的气流速度降低,负压区逐渐减小。

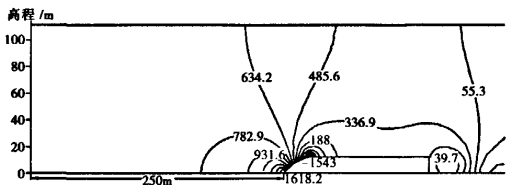


图 7 模型 1 压力等值线图(单位:Pa)
Fig. 7 Pressure contour map of model 1

图 8 为滑体前方地面 (P_1 面) 压力变化曲线。由 P_1 面压力变化曲线可得出气浪流场压力在水平方向的变化规律:滑体前缘近地面处压力极大,约为 1 618 Pa,在距滑体前缘 100 m 范围内压力陡降为 735 Pa;其后压力随着距滑体前缘距离增加而变化缓慢,在距滑体前缘 500 m 范围内压力已减少到 750 Pa 左右。图 9 为滑体前缘 0 m 处沿竖向 (P_0 纵断面) 压力变化曲线。由图可知,随着距地面垂直距离的增加压力逐渐减小,在地面处压力值最大约为 1 618 Pa;由地面向上 33 m 范围内压力变化较大,从 1 618 Pa 递减到 541 Pa;从 30 m 往上到 112 m 范围内压力渐趋于稳定值,约为 535 Pa。

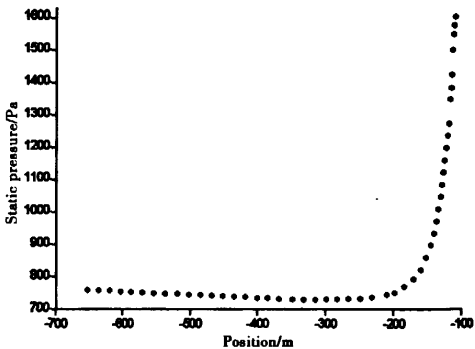


图 8 P_1 前缘地面压力变化曲线
Fig. 8 Pressure curve of P_1

图 10 为滑体前方距滑体 50 m、100 m、150 m、200 m 和 350 m 处,竖向纵断面压力变化曲线图。

由图可知:当距滑体前缘 50 m 处时,压力流场在垂直方向的变化呈近似于三角函数关系的正切递减趋势,从下往上压力值由 830 Pa 递减到 654 Pa;当距滑体前缘 100 处时,压力流场在垂直方向的变化幅度已明显减小,压力值由 753 Pa 递减到 711 Pa;当距滑体前缘 200 m 以外时,压力场在垂直方向的变化较小,曲线近于垂直直线,基本趋于稳定值。

图 11 为模型 1 运动中周围流场湍流动能分布等值线图。由图可知,模型 1 的湍流动能在尾部明显大于前缘,说明滑体下滑过程中,尾部直立壁面处的流体中局部速度、压力等力学量在时间和空间发生不规则脉动的流体运动,运动轨迹不规则。而在竖直方向上,滑体运动过程中所引起的气体湍流动能分布在 16 m 以上已较小,其值已小于 $7.37 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

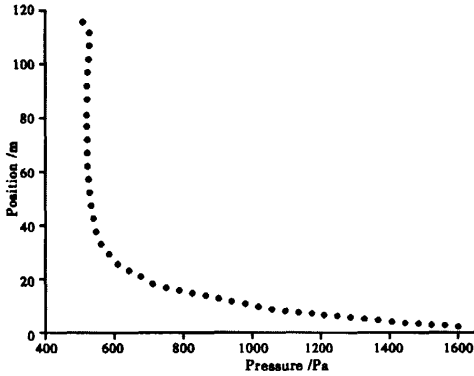
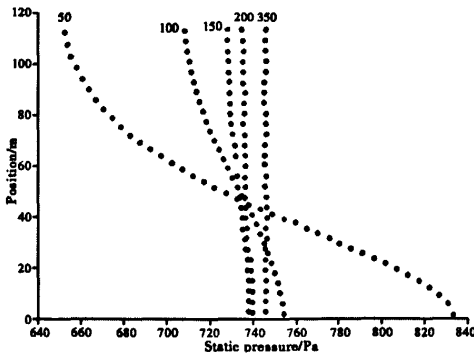


图 9 P_0 纵断面压力变化曲线

Fig. 9 Pressure curve of P_0



(50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 350 m)

图 10 距滑坡体前缘不同位置压力变化曲线

Fig. 10 Pressure curves of different positions

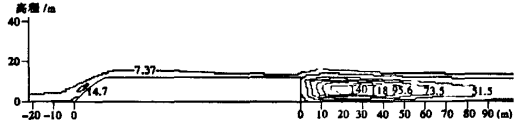


图 11 模型 1 周围流场湍流动能分布等值线图(单位: m^2/s^2)

Fig. 11 Flow turbulent kinetic energy contours around landslide of model 1

3.2 模型 2 滑体引起的冲击气浪流场计算结果

图 12 为滑体前方 60 m 范围内的速度等值线图。由图可知,模型 2 中流体的速度最大值也出现在滑体前缘上方,约为 69.3 m/s ,其形态与模型 1 基本相同。近滑体前缘壁面处等值线分布较为密集。与模型 1 相比,模型 2 滑体尾部速度场差别较大,模型 2 在尾部也出现较大速度区域,出现位置与滑体前缘最大速度位置关于滑体几何中心线对称,速度值约为 65.8 m/s 。

图 13 为模型 2 在滑体前方 200m 范围内的压力分布情况。由图可知:模型 2 压力等值线以滑体中心线为对称轴,两边对称分布。最大值出现在前缘近地面处,约为 960 Pa,明显小于模型 1。滑体上方出现两处较大的负压区,分别以前缘和尾部的上方拐点为圆心呈同心环状分布,前缘处负压最大值为 $-3\,077.5 \text{ Pa}$,尾部处负压最大值为 $-2\,890 \text{ Pa}$ 。

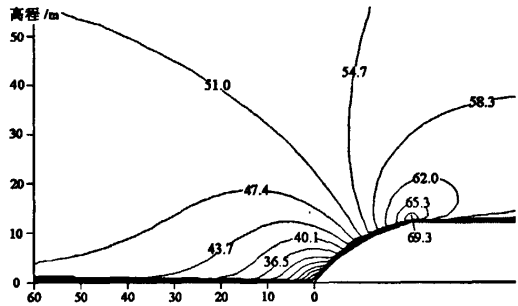


图 12 模型 2 速度等值线图/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 12 Velocity contour map of model 2

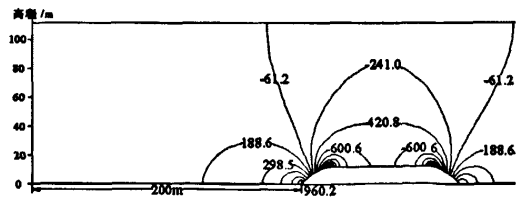


图 13 模型 2 压力等值线图/Pa

Fig. 13 Pressure contour map of model 2

图 14 为滑体前方地面(P_1 面)压力变化曲线。由 P_1 面压力变化曲线可得出气浪流场压力在水平方向的变化规律:模型 2 水平方向压力变化趋势与模型 1 相同,滑体前方均为正压区;滑体前缘靠近地面处压力最大,约为 958 Pa,在距滑体前缘 100 m 范围内压力陡降为 102 Pa;随后压力变化缓慢,在距滑体前缘 500 m 范围内压力逐渐减少到约 100 Pa。

图 15 为滑体前缘 0 m 处沿竖向(P_0 纵断面)压力变化曲线。由图可知,模型 2 在 P_0 纵断面上的压力变化趋势与模型 1 相似,随着距地面垂直距离的增加压力逐渐减小;在地面处压力出现最大值,约为 1 000 Pa;与模型 1 不同的是模型 2 在垂直方向出现负压区,在距地面 20 m 以内为正压区,压力变化幅度较大,由约 1 000 Pa 递减到 0 Pa;而在距地面 20 ~ 112 m 为负压区,压力值趋于稳定,约为 -120 Pa。

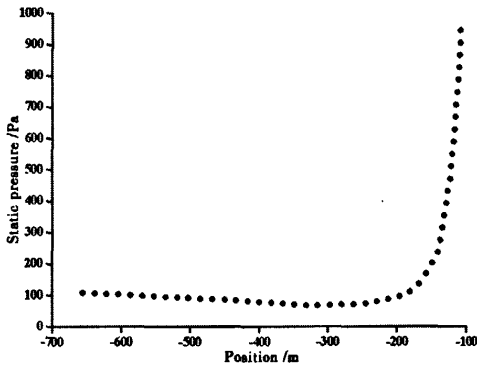


图 14 P_1 前缘地面压力变化曲线

Fig. 14 Pressure curve of P_1

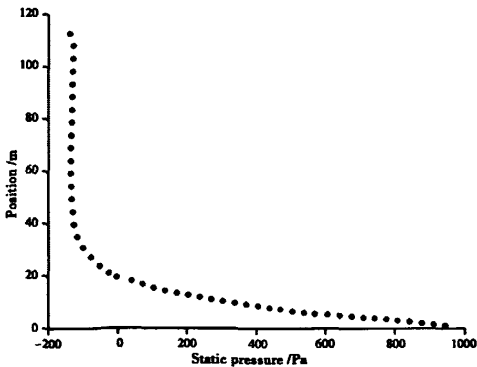


图 15 P_0 纵断面压力变化曲线

Fig. 15 Pressure curve of P_0

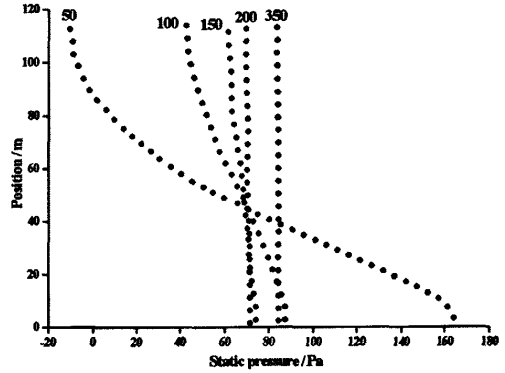


图 16 距滑坡体前缘不同位置压力变化曲线

(50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 350 m)

Fig. 16 Pressure curves of different positions

图 16 为滑体前方距滑体 50 m、100 m、150 m、200 m 和 350 m 处,竖向纵断面压力变化曲线图。由图可知:模型 2 的 5 个纵断面压力变化趋势与模型 1 相同,压力流场在垂直方向的变化呈近似于三角函数关系的正切递减趋势,但两种情况下压力值大小明显不同,且模型 2 在距滑体前缘 50 m 处出现负压,从下往上压力值由 161 Pa 递减到 -11 Pa;在距滑体前缘 100 m 处时,压力场在垂直方向的变化已明显减小,压力值由 84 Pa 减到 47 Pa;在距滑体前缘 200 m 以外时,压力场在垂直方向的变化较小,曲线近于垂直直线,基本趋于稳定值。

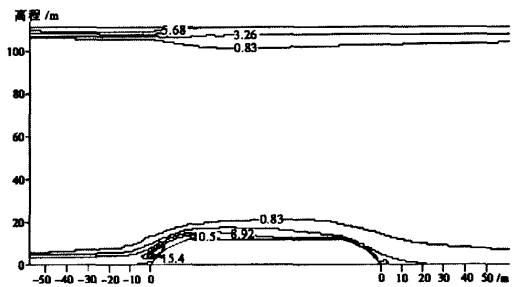


图 17 模型 2 周围流场湍流动能分布等值线图/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 17 Flow turbulent kinetic energy contours around landslide of model 2

图 17 为模型 2 滑体运动周围流场湍流动能分布等值线图。由图可知,模型 2 的湍流动能较模型 1 要小,且主要分布在前缘壁面附近。说明流线型尾部有利于气流的扩散,不会产生大的流体脉动。

3.3 模型 3 滑体引起的冲击气浪流场计算结果

图 18 为模型 3 滑体前方 60 m 范围内的速度等

值线分布图。由图可知,与模型2相比,模型3前缘处流体的运行轨迹变化较大,在近前缘壁面处,气浪流体呈垂直向上运动,到达滑体上壁面以后,流体转为向滑体后方运动。气浪速度的最大值出现在滑体前缘与上边界交点处上方,约为65.3 m/s,且在该数值的等值线围成的区域内出现湍流漩涡。滑体前缘上方角点处,速度等值线分布图较密集,说明直立的前缘壁面,成为流体扩散的障壁,使流体不易扩散,在角点处大量聚集。

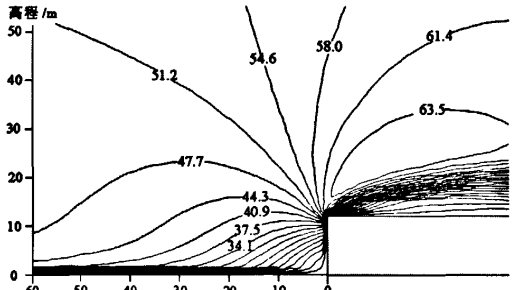


图 18 模型 3 速度等值线图/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig. 18 Velocity contour map of model 3

图 19 为模型 3 在滑体前方 200 m 范围内的压力变化情况。由图可知:模型 3 产生的冲击压力最大值出现在前缘壁面近地处,约为 1 658 Pa;滑体尾部压力较小。在滑体上方出现较大的负压区,滑体上壁面与前缘壁面交点处,负压值最大,约 -1 600 Pa。

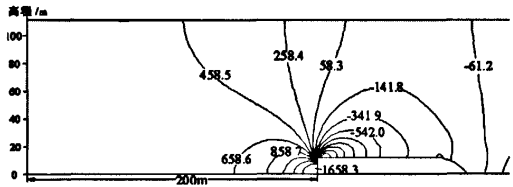


图 19 模型 3 压力等值线图/Pa
Fig. 19 Pressure contour map of model 3

图 20 为模型 3 滑体前方地面(P_1 面)压力变化曲线。由图可见,流场压力在水平方向的变化趋势类似于前两种模型,随着距滑体前缘距离的增加,压力逐渐减小。滑体前方区域为正压区,最大压力值在滑体前缘近地面处,约为 1 658 Pa。在距滑体前

缘 100 ~ 200 m 范围内压力值变化幅度较大,由 1 658 Pa 递减到 529 Pa;随后逐渐趋于稳定,约为 529 Pa。

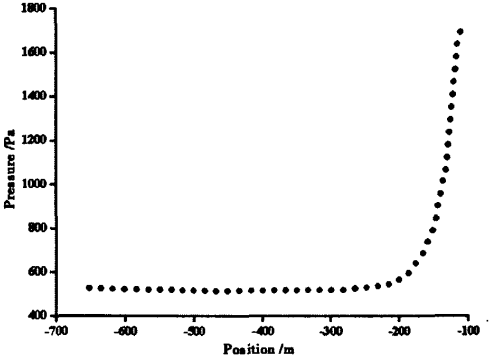


图 20 P_1 前缘地面压力变化曲线
Fig. 20 Pressure curve of P_1

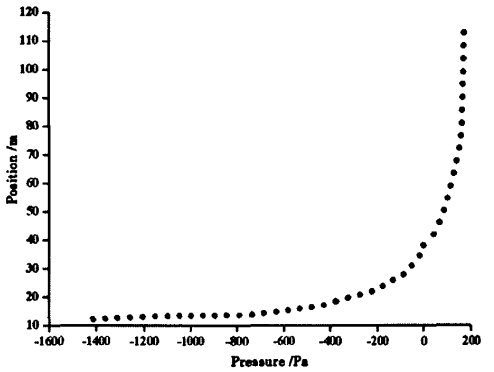


图 21 P_0 纵断面压力变化曲线
Fig. 21 Pressure curve of P_0

图 21 为滑体前缘 0 m 处沿竖向(P_0 纵断面)压力变化曲线。由图可知:随着距地面距离的增加,压力逐渐增大,在滑体上方出现大面积负压区。在距地面 10 ~ 30 m 处均为负压区,压力值变化幅度较大,由最大负压值 -1 427 Pa 急剧增加到 0 Pa。30 m 以外转为正压区,在距地面 30 ~ 60 m 之间,压力由 0 Pa 增加到 142 Pa;60 ~ 112 m 范围内,压力基本趋于稳定,约为 145 Pa。

图 22 为滑体前方距滑体 50 m、100 m、150 m、200 m 和 350 m 处,竖向纵断面压力变化曲线图。由图可知,模型 3 在 5 个不同位置纵断面上的竖向压力变化趋势与前两个模型相同。距滑体前缘 50

m 处,压力流场在垂直方向的变化呈近似于三角函数关系的正切递减趋势,压力值变化较大,由 754 Pa 递减到 352 Pa;当距滑体前缘 100 m 处时,压力流场在垂直方向的变化幅度已明显减小,压力值由约 552 Pa 递减到约 482 Pa;在距滑体前缘 200 m 以外,压力变化较小,近于垂线。

图 23 为模型 3 滑体运动周围流场湍流动能分布等值线图。由图可知,模型 3 的湍流动能较模型 2 要大得多,主要分布在滑体上方和后方。说明,滑体前缘壁面倾斜角度对湍流动能和耗散率的分布有一定的影响,壁面倾角越大,湍流动能越大。在纵向上,滑体上方 25 m 以上范围已受滑体影响较小。

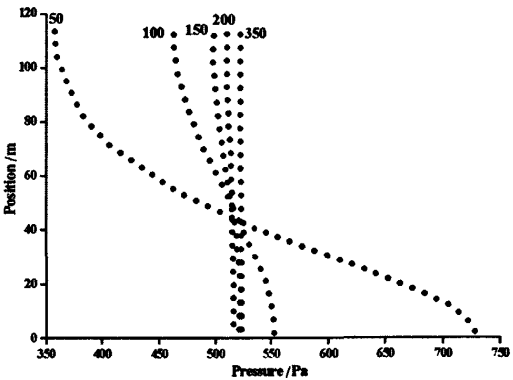


图 22 距滑坡体前缘不同位置压力变化曲线
(50 m,100 m,150 m,200 m,350 m)

Fig. 22 Pressure curves of different positions

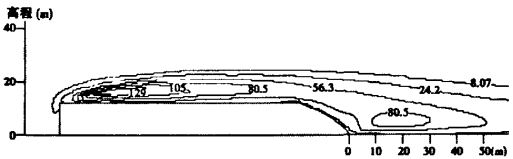


图 23 模型 3 周围流场湍流动能分布等值线图/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Fig. 23 Flow turbulent kinetic energy contours around landslide of model 3

4 结论

本文描述了不同形状的滑坡在滑动阶段沿滑面高速俯冲到地面上时,其超前气浪的特征。综合上述三种滑坡模型数值模拟计算结果,将滑坡体运行速度相同、长度相同、周围环境相同的条件下,高速

滑坡超前气浪的特征和影响区域归纳见表 5 和表 6 所示。由此可以得出以下结论:

1. 高速远程滑坡产生的超前冲击气浪速度在滑体前方的分布受滑体前、后缘形态的影响较小。
2. 高速远程滑坡产生的冲击气浪压力受滑体前、后缘形态的影响较大。
3. 高速远程滑坡超前冲击气浪影响区域与滑体前、后缘形态有关。滑体前、后缘壁面倾角越大,冲击气浪影响区域越大。
4. 滑体前、后缘形态还影响着滑体周围湍流动能的大小。壁面越陡,越易出现湍流漩涡,湍流动能也越大;当壁面倾角约为 45° 时,没有湍流漩涡产生。
5. 高速滑坡在下滑过程产生的超前冲击气浪压力,与地表特殊状态下风力的大小相似。可参考不同风级的破坏能力,将 3 个滑坡模型超前冲击气浪的破坏能力分析如表 7 所示。可见,高速远程滑坡所产生的超前气浪的破坏能力,在滑坡运动前方 500 m 的范围内,还能达到飓风(风力 12 级)的量级。从而确定了滑坡超前冲击气浪潜在威胁的范围和破坏作用的强度。

表 5 模型速度和湍流动能对比表

Fig. 5 Comparisons of velocity and turbulence of three models by numerical simulation / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

| 模型 | 形态 | | 滑体前缘速度值 | | 湍流动能 |
|------|------------------|------------------|---------|------|------------------|
| | 前缘 | 尾部 | 位置 | 数值 | |
| 模型 1 | 壁面倾角约 45° | 壁面直立 | 滑坡体前缘上方 | 70.1 | 尾部出现较大湍流漩涡,湍流动能大 |
| 模型 2 | 壁面倾角约 45° | 壁面倾角约 45° | 滑坡体前缘上方 | 69.3 | 湍流动能较小 |
| 模型 3 | 壁面直立 | 壁面倾角约 45° | 滑坡体前缘上方 | 65.3 | 滑体上方和尾部出现较大湍流动能 |

表 6 模型压力对比表

Fig. 6 Comparison of pressure of three models /kPa

| 模型 | 位置 (m) | | | | | | | 最大值 |
|------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 350 | 500 | |
| 模型 1 | 1 618 | 830 | 753 | 738 | 737 | 744 | 758 | 1 618 |
| 模型 2 | 958 | 161 | 84 | 70 | 71 | 82 | 97 | 958 |
| 模型 3 | 1 658 | 754 | 552 | 522 | 514 | 520 | 529 | 1 658 |

表7 高速滑坡超前冲击气浪破坏能力分析

Fig.7 Intensity of the devastating airstblast

| 模型 | 距滑体前缘 距离/m | 压力值 /Pa | 等价风级 | 破坏能力 |
|-----|---------------|------------|------|---------------|
| 模型1 | 0 | 1 618 | >12 | 摧毁力极大 |
| | 100 | 750 | 12 | 摧毁力极大 |
| | 500 | 758 | 12 | 摧毁力极大 |
| 模型2 | 0 | 958 | >12 | 摧毁力极大 |
| | 100 | 90 | 6 | 小树枝摇动,电线呼呼响 |
| | 500 | 100 | 6 | 小树枝摇动,电线呼呼响 |
| 模型3 | 0 | 1 658 | >12 | 摧毁力极大 |
| | 100 | 552 | 11 | 陆上少见,有则必有广泛破坏 |
| | 500 | 529 | 11 | 陆上少见,有则必有广泛破坏 |

参考文献 (Reference)

[1] Heim A. Bergsturz und Menschenleben [M]. Zütich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932. (English translation by Skerner N A. Landslides and human lives [M]. Vancouver, B C: BiTech Publishers Ltd, 1989;1 - 196)

[2] Hadley J B. Madison Canyon rockslide, Montana, U. S. A [C]//Voight B ed. Rockslides and Avalanches. Vol. 1, Natural Phenomena. New York: Elsevier, 1978;167 - 180

[3] Kiersch G A, Asce F. Vaiont reservoir disaster [J]. Civil Engineering, 1964, (3): 32 - 39

[4] Fahnstocck R K. Little Tahoma Peak rockfalls and avalanches, Mount Rainier, Washington, U. S. A [C]//Voight B ed. Rockslides and Avalanches. Vol. 1, Natural Phenomena. New York: Elsevier, 1978;181 - 196

[5] Shi yafeng, Tang bangxing, Xu bing, et al. Investigation on Lannigou huge rock avalanche, in Luquan County, Yunnan Province [C]//Proceedings of the first symposium of debris flows and landslides prevent and control in China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1993;188 - 194 [施雅风, 唐邦兴, 许兵, 等. 云南省禄劝县普福河烂泥沟特大崩塌型滑坡调查研究报告 [C]//首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集. 昆明: 云南科技出版社, 1993;188 - 194]

[6] Pfaffner G, Ericksen G E. Nevados Huascaran avalanches, Peru [C]//Voight B ed. Rockslides and Avalanches. Vol. 1, Natural Phenomena. New York: Elsevier, 1978;277 - 314

[7] Jia xuelang. Research on the mechanic and movement mode of rock-slide-avalanche in Yanchihe Phosphate Mountain, Yichang, Hubei Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1983;1 - 89 [贾雪浪. 湖北宜昌盐池河磷矿山体滑崩机理及其运动方式的研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 1983;1 - 89]

[8] Hu Guangtao. Landslide dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995 [胡广韬. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995]

[9] Jiang Yun, Zhao Qihua, Yan Ming, et al. Xi Kou mountain landslide-debris flow, China [C]//Bell ed. Landslides. Rotterdam:

Balkema, 1991;133 - 138

[10] Tan Jizhong. Research on the characteristics of Touzhaigou high-speed landslide in Yunnan Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1993, 4 (1): 37 - 44 [谭继中. 云南头寨沟大型高速滑坡运动特征探讨 [J]. 地质灾害与环境保护, 1993, 4 (1): 37 - 44]

[11] Morrissey M M, Wiczorek G F, Savage W Z. Airblasts generated from rock-fall impacts: Analysis of the 1996 Happy Isles event in Yosemite National Park [J]. Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets, 1999, 104 (10): 23189 - 23198

[12] Wiczorek G F, Snyder J B, Waitt R B, et al. Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California [J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112 (1): 75 - 85

[13] Hung Jujiang, Lee Chyityi, Lin Meiling. A flying mountain and dam-up lake (Tsaoing Rockslide) [J]. Sino-Geotechnics, 2000, 77: 5 - 18 [洪如江, 李锡堤, 林美聆, 等. 天玺可以飞渡, 崩山足以断流 (草岭顺向坡滑动) [J]. 土工技术 (台湾), 2000, 77: 5 - 18]

[14] 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): 11 - 20 [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): 11 - 20]

[15] Xu Qiang, Pei Xiangjun, Huang Runqiu. Large-scale landslides induced by the Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2009 [许强, 裴向军, 黄润秋. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009]

[16] Cheng Qiangong, Zhang Zhuoyuan, Huang Runqiu. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25 (1): 72 - 84 [程谦恭, 张卓元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势 [J]. 山地学报, 2007, 25 (1): 72 - 84]

[17] Keller D, Vonnegut B. Wind speeds required to drive straws and splinters into wood [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15: 899 - 901

[18] He Daliang, Chen Fusheng, Zeng Guangyong. Wind tunnel test of wind to turn train in great wind region, Xinjiang [C]//Memoirs of Institute of desert, Academy Sinica, Lanzhou, China, No. 2. Beijing: Science Press, 1982;99 - 107 [贺大良, 陈福生, 曾广涌. 新疆大风地区翻车风速的风洞实验 [C]//中国科学院兰州沙漠研究所集刊, 第2号. 北京: 科学出版社, 1982;99 - 107]

[19] Eissbacher G H, Clague J J. Destructive mass movements in high mountain: hazard and management [M]//Geological Survey Canada. Ottawa: Canadian Government Publishing Centre, 1984;84 - 16

[20] Azzoni A, Chiesa S, Frassoni A, et al. The Valpola landslide [J]. Engineering Geology, 1992, 33;59 - 70

[21] Wang Fujun. Analysis of computational fluid dynamics: software principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 [王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004]

- [22] Cheng Qiangong, Peng Jianbing, Hu Guangtao, et al. Dynamics of rockslide-avalanches [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999 [程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡动力学 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999]
- [23] Qian-gong Cheng, Yu-feng Wang. Nanda rockslide-avalanche of 14 August 2002, in Ailao Mountain, Yunnan Province, China [C] // Williams, et al. eds. Geologically active-volume of papers from the 11th congress of the international association for engineering geology and the environment. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010: 93 - 102
- [24] Wang Ruijin, Zhang Kai, Wang Gang. Technical basics and applied case studies of Flent [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007 [王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007]

Dynamics of the Airblasts Generated by Rock Avalanches

CHENG Qiangong, WANG Yufeng, ZHU Qi, WANG Hongdan

(Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Rock avalanches are commonly preceded by a strong blast of air. As a result of the huge volumes of material involved and long distances traveled, the major threat of rock avalanche to lives, properties and environment comes from its preceding airblast being capable of exerting enormous impacts on objects in the runout path. It lifts roofs off houses or buildings, breaks off trees and bowls them ahead of it, scours soil and colluvium, hurls rocks and wood splinters through the air, spatters mud up trees and rolls people along the ground or lifts them high in the air as the autumn wind whirls fallen leaves. This preceding blast of wind acted powerfully only in the direction in which the rock masses shot forward, but that laterally it was entirely insignificant, so the substantial damage caused by a rock avalanche is often beyond the limits of distal debris; besides, its velocity was so great in the track that as it shot out from ahead of the displaced mass detached from the slope, a powerful airblast can carry blocks of rock to cross the narrow valley and impact the opposite slope with subsequent upstream and downstream surging and run up, fall back, and finally run back up the source slope before coming to rest. In mechanism, the airblast was attributed to air pressure rise in front of a fast-moving avalanche, and its movement can be described by the model of viscous, incompressible, steady flow of aerodynamics theory. So three models of the slide bodies on slip surface with different shapes are established and the characteristics of flow field surrounding the bodies are simulated by the software for numerical hydrodynamics, Computational Fluid Dynamics. It is showed that the airblast is controlled remarkably by the shape of slide body, the larger obliquity of walls of leading edge and rear edge of slide body, the greater of the airblast pressure. Within 500 m in front of the slide body with leading edge of vertical wall, the intensity of devastating airblast pressure is equivalent to 11 ~ 12 wind pressure; whereas the airblast caused by the slide body with leading edge of wing-type is minimum, which is equivalent to 6 wind pressure in the 100 m away from leading edge of slide body. Accordingly the potential devastated region and intensity of the airblast can be ascertained, which provides an important base for the hazard assessment of airblast.

Key words: airblast; dynamics; rock avalanche; numerical simulation

作者: [程谦恭](#), [王玉峰](#), [朱圻](#), [王宏丹](#), [CHENG Qiangong](#), [WANG Yufeng](#), [ZHU Qi](#), [WANG Hongdan](#)
作者单位: [西南交通大学地质工程系, 四川成都, 610031](#)
刊名: [山地学报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)
年, 卷(期): 2011, 29(1)
被引用次数: 1次

参考文献(25条)

1. [Heim A](#) [Bergsturz und Menschenleben](#) 1932
2. [Skemer N A](#) [Landslides and human lives](#) 1989
3. [Hadley J B](#) [Madison Canyon rockslide, Montana, U. S. A](#) 1978
4. [Kiersch C A](#); [Asce F](#) [VaionI reservoir disaster](#) 1964(03)
5. [Fahnestock R K](#) [Little Tahoma Peak rockfalls and avalanches, Mount Rainier, Washington, U. S. A](#) 1978
6. [施雅风](#); [唐邦兴](#); [许兵](#) [云南省禄劝县普福河烂泥沟特大崩塌型滑坡调查研究](#) 1993
7. [Plafker G](#); [Ericksen G E](#) [Nevados Huascaran avalanches, Peru](#) 1978
8. [贾雪浪](#) [湖北宜昌盐池河磷矿山体滑崩机理及其运动方式的研究](#) 1983
9. [胡广韬](#) [滑坡动力学](#) 1995
10. [Jiang Yun](#); [Zhao Qihua](#); [Yan Ming](#) [Xi Kou mountain landslide-debris flow, China](#) 1991
11. [谭继中](#) [云南头寨沟大型高速滑坡运动特征探讨](#)[期刊论文]-[地质灾害与环境保护](#) 1993(01)
12. [Morrissey M M](#); [Wieczorek G F](#); [Savage W Z](#) [Airblasts generated from rock-fall impacts: Analysis of the 1996 Happy Isles event in Yosemite National Park](#)[外文期刊] 1999(10)
13. [Wieczorek G F](#); [Snyder J B](#); [Waitt R B](#) [Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California](#)[外文期刊] 2000(01)
14. [洪如江](#); [李锡堤](#); [林美聆](#) [天堑可以飞渡, 崩山足以断流\(草岭顺向坡滑动\)](#) 2000
15. [刘伟](#) [西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析](#)[期刊论文]-[中国地质灾害与防治学报](#) 2002(03)
16. [许强](#); [裴向军](#); [黄润秋](#) [汶川地震大型滑坡研究](#) 2009
17. [程谦恭](#); [张倬元](#); [黄润秋](#) [高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2007(01)
18. [Keller D](#); [Vonnegut B](#) [Wind speeds required to drive straws and splinters into wood](#)[外文期刊] 1976
19. [贺大良](#); [陈福生](#); [曾广涌](#) [新疆大风地区翻车风速的风洞实验](#) 1982
20. [Eisbacher G H](#); [Clague J J](#) [Destructive mass movements in high mountain: hazard and management](#) 1984
21. [Azzoni A](#); [Chiesa S](#); [Frassoni A](#) [The Valpola landslide](#)[外文期刊] 1992
22. [王福军](#) [计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用](#) 2004
23. [程谦恭](#); [彭建兵](#); [胡广韬](#) [高速岩质滑坡动力学](#) 1999
24. [Qian-gong Cheng](#); [Yu-feng Wang](#) [Nanda rockslide-avalanche of 14 August 2002, in Ailao Mountain, Yunnan Province, China](#) 2010
25. [王瑞金](#); [张凯](#); [王刚](#) [Fluent技术基础与应用实例](#) 2007

本文读者也读过(10条)

1. [邢爱国](#); [高广运](#); [吴世明](#) [高速滑坡飞行气动特性的风洞试验研究](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#)

2. [向喜琼, 姚光华, 杨建国](#) [三峡库区地质灾害风险管控研究现状与展望](#)[会议论文]-2010
3. [周洪福, 韦玉婷, 聂德新, ZHOU Hongfu, WEI Yuting, NIE Dexin](#) [黄河上游戈龙布滑坡高速下滑成因机制及堵江分析](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#)2009, 17(4)
4. [徐波](#) [库区滑坡涌浪的产生及其传播过程的研究](#)[学位论文]2011
5. [李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 罗红明, LI Xianglong, TANG Huiming, XIONG Chengren, LUO Hongming](#) [岩石碎屑流运移堆积过程数值模拟](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#)2011, 19(2)
6. [吴越, 刘东升, 李明军, WU Yue, LIU Dongsheng, LI Mingjun](#) [滑体下滑及冲击受灾体过程中的能耗规律模型试验](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2011, 30(4)
7. [徐则民, 黄润秋, 唐正光, XU Zemin, HUANG Runqiu, TANG Zhengguang](#) [头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制](#)[期刊论文]-[地质论评](#)2007, 53(5)
8. [李林, 李锁平](#) [圆弧形滑坡反分析技术研究](#)[期刊论文]-[地质灾害与环境保护](#)2001, 12(4)
9. [杨建荣, 吕小平](#) [水库库水位降落对边坡稳定性的影响](#)[期刊论文]-[四川建筑](#)2005, 25(1)
10. [程谦恭, 陈红旗](#) [云南哀牢山大水井岩滑特征及其形成的动力学机制](#)[会议论文]-2006

引证文献(1条)

1. [徐伟, 倪化勇, 王德伟, 徐如阁](#) [鬼招手滑坡的特征及失稳机制](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2013(4)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101011.aspx