

降雨作用下滑坡转化泥石流分析研究

李 驰¹ 朱文会¹ 鲁晓兵² 崔 鹏³

(1. 内蒙古工业大学, 内蒙古呼和浩特 010051; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100084;
3. 中国科学院山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:对降雨入渗条件下诱发北川县魏家沟泥石流起动的影响因素进行研究。在室内人工降雨试验模拟泥石流起动的的基础上,得到魏家沟泥石流起动的临界雨强,并利用FLAC软件建立降雨在坡体中入渗分析的数值模拟模型,分析坡度、雨强、土性参数以及土体饱和度对坡体失稳的影响,坡体在降雨情况下塑性区的出现与延展及坡面拉应力区的发展情况。研究表明:降雨入渗后孔隙水压力的升高主要在坡脚附近,即距坡脚1/5的坡高范围内。坡脚处孔隙水压力最大,沿着坡面往上逐渐减小,且坡面较大水平位移也主要集中在1/5坡高范围内。因此,降雨入渗诱发泥石流的起动最先可能出现在坡脚附近,并随着坡度增加、雨强增大、土体饱和度增大,坡体稳定性降低至失稳,促进泥石流的起动。

关键词:滑坡;泥石流;降雨入渗;数值模拟;人工降雨室内试验

中图分类号:P642.23 X141 **文献标识码**:A

文章编号:1000-131X(2010)增-0499-07

Studied on landslide translating into debris-flow under rainfall

Li Chi¹ Zhu Wenhui¹ Lu Xiaobing² Cui Peng³

(1. Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China)

Abstract: The parameters affected unsteady of landslide and induced of debris-flow under rainfall in Weijia Gully in Beichuan, Sichuan province were analyzed. Several experiments on the initiation of debris flow under different slopes were carried out in a flume before. The critical rainfall strength exciting the initiation of debris flow in Weijia Gully was obtained. Based on which the numerical model for modeling unsteady of landslide and initiation of debris flow under rainfall was established using the software FLAC. The effects of the slope, rain strength, soil parameters and saturation were investigated. The initiation and expansion of the plastic zone, and the development of the tensile stress zone in the slope under rainfall were also investigated. It indicated that the zone with high pore water pressure mainly near the slope toe with one fifth of the slope height. The pore water pressure at the slope toe was the highest, and decreased from the toe to top. The large horizontal displacements of the slope were mainly near the slope toe with one fifth of the slope height. Therefore, the initiation of debris flow under rainfall was first at the slope toe. With the increase of the slope angle and rain strength and saturation degree, the stability of the slope decreased to cause the debris-flow.

Keywords: landslide; debris-flow; rainfall; numerical simulation; artificial rainfall experiment indoor

E-mail: tjdxlch2003@126.com

引 言

泥石流是一种常见的山地自然灾害,以其突发

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)“汶川地震次生山地灾害形成机理与风险控制”(2008CB425802)和中科院三期创新方向性项目(KZCX2-YW-302-02)

作者简介:李驰,博士,教授

收稿日期:2010-08-24

性和破坏力强为人们所重视。泥石流是降雨、地形地貌、固体松散堆积物等因素共同作用的结果^[1]。其中以降雨引起的泥石流(称降雨型泥石流)分布最广,活动最频繁,因而是泥石流起动机理研究的主要对象。

国内外不少学者对泥石流起动做了一些研究,研究结果中也得到了一些较好的泥石流起动判别准则。其中,国内最具代表性的是崔鹏和戴福初等

的研究。崔鹏于1989年在九寨沟开展了泥石流起动机理的试验研究^[2-3],试验中考虑了影响泥石流起动的三个主要因素:底床坡度、颗粒级配、水分条件。同时还考虑了散粒和浆体状态下堆积厚度对泥石流起动的影响。文献[2]给出了泥石流起动的定义,泥石流起动的过程被概括为两个阶段:侵蚀搬运形成准泥石流体和准泥石流体起动转变为泥石流。在此基础上,推导了泥石流起动条件曲面。

戴福初等学者通过对土样的偏压固结不排水剪和偏压固结常应力排水剪试验^[4-5],详细分析了香港火山岩坡残积土地区滑坡转化为泥石流的过程,揭示了该地区土体达到峰值强度后强烈的应变软化特性。戴福初通过三轴试验,模拟了降雨条件下坡面上土体的力学行为,对滑坡型泥石流用土体液化流动的观点加以解释,其核心是强调土体力学行为控制的滑坡破坏方式对其破坏后运动形式的影响^[6]。

此外,美国地质调查局Iverson博士等人^[7-10],借鉴土力学中的关于孔隙水压力增长和消散的理论,研究泥石流在起动和运动过程中,孔隙压力的增长、消散及维持的机理。应用非饱和土强度理论,研究了降雨型泥石流的成因和形成过程,并对降雨作用机理和固体松散物质的力学性质变化特征进行了探讨^[11]。文献[12]运用有限元法模拟降雨条件下饱和-非饱和土坡暂态渗流场的变化情况,分析了降雨强度、降雨历时以及土壤饱和渗透系数等参数对非饱和土坡基质吸力的影响。研究表明雨水入渗引起土壤基质吸力的大量丧失是降雨型泥石流起动的

主要原因。

总结已有研究成果,本文在对北川县魏家沟泥石流起动机理进行人工降雨试验数据的基础上,进行数值模拟,对降雨作用下滑坡转化泥石流的主要诱发因素进行分析,分析坡度、雨强、土体饱和度以及土性参数对坡体失稳促进泥石流起动的影响,对坡体在降雨入渗下塑性区的出现、延展情况进行定性分析。文中研究成果可以作为预测泥石流的起动和开展泥石流灾害的防治工作的参考。

1 人工降雨试验研究

本试验主要采用室内试验的方法研究降雨情况下泥石流起动条件。通过改变试验条件模拟不同工况下各参数对泥石流起动的影响,研究降雨诱发泥石流起动的临界雨强。

1.1 试验概况

试验土样取自北川魏家沟源区土,力学参数见表1。试验装置采用一可调坡度的模型槽,见图1,通过自制人工降雨装置给模型降雨。土体模型形状为梯形,上底35cm,下底52cm,宽21cm,铺土厚度10cm,上表面积735cm²,下底面积1092cm²,体积9135cm³,土体下接触面为一石板,石板固定于滑坡槽内。试验中,调节石板接触面的倾角,用于模拟梯形堆积体的坡角,并设置27°、30°、33°三组不同坡角,每组试验采用相同的模型,对该三组坡角分别采用不同的降雨量进行试验。试验模拟坡角和雨强对泥石流起动过程的影响。

表 1 魏家沟土体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of Weijia Groove soil

干密度 (kg/m ³)	饱和度 (%)	孔隙率	渗透系数 (cm/s)	体积模量 GPa	剪切模量 GPa	凝聚力 kPa	内摩擦角 (°)
1600	90	0.56	2.0× 10 ⁻³	4.8	4.2	6.8	28.4

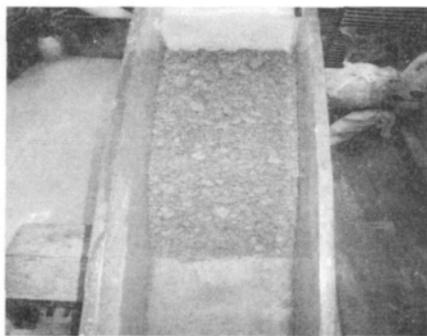


图 1 模型试验装置

Fig. 1 Photo of the model box

1.2 试验方案

试验中采用的降雨量见表2。试验时,首先将滑坡槽固定,把角度调到试验所需高度,然后用天平测试验所需质量的土,将土分多次铺放于滑坡槽内石板上,用铲将土按试验规定尺寸铺放于模型槽内。试验前测定降雨量,采用人工降雨装置对试验土体进行人工降雨,观察土体变形,记录开始降雨时间、每次滑坡时间及降雨量,直到试验土体基本滑坡完毕即停止降雨。改变降雨量,重复以上步骤。一个角度试验结束后,调整滑坡槽角度,模拟不同接触面倾角,进行下一组试验。

表 2 人工降雨试验雨强
Table 2 Rain strength in experiments

坡度(°)	雨强 (mm/min)					
27	1.025962	1.346154	1.923077	2.115385	2.413846	2.403846
30	0.865385	1.221154	1.730769	1.826923	3.144231	-
33	0.721154	1.25	1.471154	1.826923	2.692308	-

1.3 试验结果与分析

根据试验测得的数据,可以得到魏家沟泥石流启动时间曲线,总结不同坡角下泥石流启动时雨强的变化以及所需总雨量,分别见图2和图3。

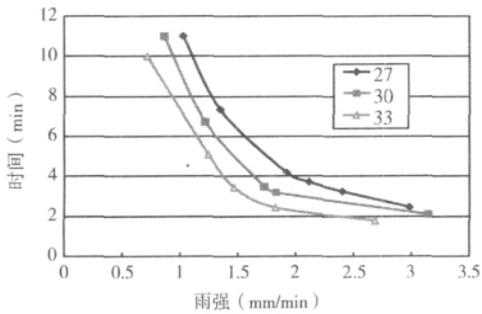


图 2 泥石流启动雨强-时间曲线

Fig. 2 Relation of the initiation time of debris flow and rain strength

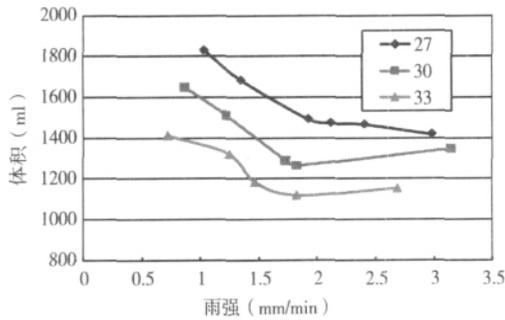


图 3 泥石流启动雨强-总雨量曲线

Fig. 3 Total of the rain versus the rain strength

通过分析可知,对汶川震区土来说,相同雨强下,坡度越大,泥石流启动时间越短。而对于同一坡度,随雨强增加,总雨量有减小的趋势,这说明泥石流启动受雨滴冲刷作用的影响,这种冲刷作用给土体含有沿斜面向下的分力,这一分力随雨强的增大而不断增大,使得大雨强启动泥石流所需总雨量相对较小。当雨强逐渐变小时,泥石流启动所需时间不断增大,当雨强减小到一定值,泥石流启动所需时间将趋近于无穷大,即不能激发泥石流,此时的雨强即为临界雨强。临界雨强的大小又受到坡角等因素的影响。有人提出了最小临界雨强,即不同条

件下,发生泥石流所需的最小雨强。最小临界雨强的确定需要进行大量的实验室和现场泥石流试验才能得出。根据本试验可以大致确定汶川震区土的最小临界雨强为0.5~1mm/min。对汶川震区土来说,由泥石流发生时所需要的总雨量曲线可以得出:当土体坡度增大时,土体会在低饱和度下破坏;当土体坡度减小时,土体则会在更高的饱和度下破坏。

2 FLAC数值模拟

2.1 数值模型的建立

该数值模拟所用软件是FLAC5.0,该软件是二维有限差分计算程序,主要用来模拟泥石流启动时的大变形、大应变、非线性及非稳定系统的问题。

按照魏家沟坡体剖面尺寸建立平面应变数值计算模型,模型上底2.00m,下底10.17m,高4.44m,坡角27°,边界条件为模型底部水平、竖直方向全约束,垂直边界设水平方向约束,其余两个边为自由边界。

计算中,假定降雨作用下坡体稳定渗流,且考虑流固耦合的影响,底部设为不透水边界。降雨时雨强均匀加在两个自由边上,模型及边界条件见图4。坡体力学行为服从摩尔-库伦准则,计算参数见表1。

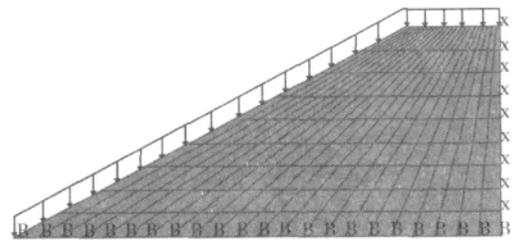


图 4 模型及边界条件

Fig. 4 Model and boundary in numerical simulation

2.2 模拟计算方案

通过FLAC数值模拟,主要考察降雨作用下,雨强大小、土体饱和度、土性以及坡角对坡体失稳促进泥石流启动的影响。

从泥石流的特征(产生大位移)以及诱发降雨泥石流的根本原因(孔隙水压力急剧增加,来不及排出,抗剪强度降低,坡体出现塑性区并迅速沿坡面开展,坡体产生泥石流),数值模拟中以孔隙水压力变化、坡体位移变化以及坡体塑性区发展作为坡体失稳促进泥石流启动的判别标准。

(1)魏家沟震区土模型按坡角不同分三组,对该三组坡角分别给予不同的雨强,各组雨强取值见表3。

表 3 震区土模拟雨强

Table 3 Rain strength in numerical simulation

坡度(°)	雨强 (m/s)		
27	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	10.0×10^{-8}
30	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	10.0×10^{-8}
33	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	10.0×10^{-8}

表 4 粉土力学参数表

Table 4 Mechanical parameters of silt

干密度 (kg/m^3)	饱和度 (%)	孔隙率	渗透系数 (cm/s)	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	凝聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
1350	90	0.5	2.83×10^{-5}	60	24	32	21.09

表 5 震区土模拟饱和度

Table 5 Saturation in numerical simulating for seismic soil

土体饱和度 (%)	坡角(°)	雨强(m/s)		
60	27	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	10.0×10^{-8}
90	27	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	10.0×10^{-8}

2.3 数值模拟结果与分析

2.3.1 孔隙水压力的变化

(1) 相同雨强,不同坡度条件下。

以雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例分析,在相同雨强,不同坡度下,坡面点孔隙水压力变化曲线见图5。

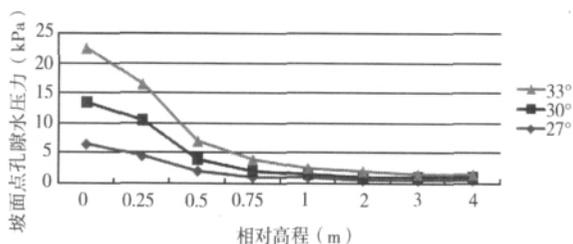


图 5 坡面点孔隙水压力变化曲线

Fig. 5 Variation of pore water pressure along slope surface

图中以坡脚处为坐标原点,以坡面各点的竖向坐标作为相对高程,考察三种不同坡度下,坡面各点孔隙水压力的变化。可以看出,降雨入渗后孔隙水压力的集聚主要在坡脚附近,约占坡高的1/5范围内,且坡脚处孔隙水压力最大,沿着坡面往上逐渐减小。并且随着坡度的增大,在1/5的坡高范围内,同一相对高程处孔隙水压力也随之增长,以坡脚处最大孔隙水压力增长幅度最大,说明坡度越大,坡脚处孔隙水压力越大,在雨强不变时,泥石流在坡脚

(2)按土性不同建两个模型:魏家沟震区土模型和粉土模型,魏家沟震区土力学参数见表1,粉土力学参数见表4。粉土模型坡角为 27° ,所加雨强 $10 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 。

(3)魏家沟震区土模型按土体饱和度不同分两组,每组模型给予不同的雨强,参见表5。

处越容易起动。

(2)相同坡角,不同雨强条件下。

以坡度为 27° 为例,在同一坡度,不同雨强下,坡面点孔隙水压力变化曲线见图6。

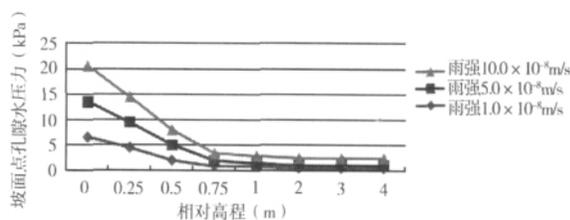


图 6 坡面点孔隙水压力变化曲线

Fig. 6 Curves of pore water pressure variation

从图6可以看出,不同雨强下孔隙水压力主要集中在坡脚附近,约占坡高的1/5范围内,且坡脚处孔隙水压力最大,沿着坡面往上逐渐减小。并且在相同坡度下,随着雨强的增大,同一相对高程处孔隙水压力也随之增长,以坡脚处最大孔隙水压力增长幅度最大,这一规律在坡度为 30° 和 33° 时得到了同样的验证。说明雨强越大时,坡脚处孔隙水压力越大,泥石流在坡脚处越容易起动。

(3)相同雨强、相同坡度,不同土性参数条件下。

以坡度为 27° ,雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例。以魏家沟震区土和粉土为两种不同土性的代表,分析坡面点孔隙水压力的变化见图7。

从图7可以看出,对于粉土模型,最大孔隙水压力也是出现在坡脚,即坡脚处最先起动,但相对于魏家沟源区土来说,粉土在坡脚处产生的孔隙水压力相对较小且不集中。

(4)相同坡度、相同雨强,不同土体饱和度条件

下。

以坡度为 27° ,雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例。魏家沟震区土模型的饱和度分别为0.9和0.6 ,分析坡面点孔隙水压力的变化见图8。

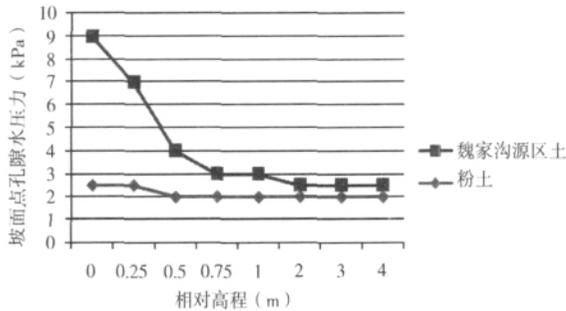


图 7 坡面点孔隙水压力变化曲线

Fig. 7 Curves of pore water pressure variation

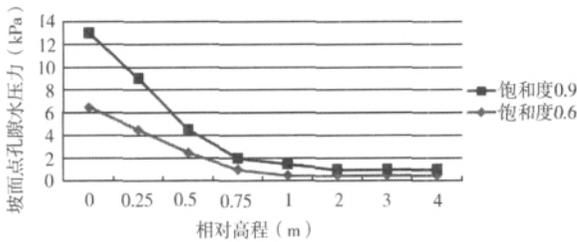


图 8 坡面点孔隙水压力变化曲线

Fig. 8 Variation of pore water pressure along slope surface

从图8可以看出 ,孔隙水压力同样主要集中在坡脚附近 ,约占坡高的1/5范围内 ,大小沿着坡面往上逐渐减小 ,并且随着饱和度的增大 ,坡脚处最大孔隙水压力也随之增长。在其他条件一定时 ,饱和度越大 ,泥石流在坡脚附近越容易起动。

2.3.2 坡体位移变化

(1)相同雨强 ,不同坡度条件下。

以雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例分析 ,在相同雨强 ,不同坡度下 ,坡面点水平位移曲线见图9。

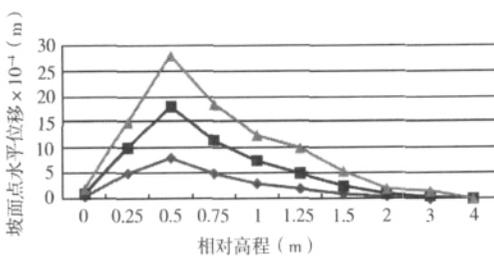


图 9 坡面点水平位移变化曲线

Fig. 9 Curves of horizontal displacement of the slopestaking

从图9可以看出 ,坡面点最大水平位移发生在相对高程为0.5m处 ,即自坡脚起向上1/8坡高位置处 ,并向两边减小 ,水平位移值较大的区域主要集中在距1/5坡高范围内 ,其他区域位移很小 ,相对稳定。

(2)相同坡角 ,不同雨强条件下。

以坡度为 27° 为例 ,在相同坡度 ,不同雨强下 ,坡面点水平位移曲线见图10。

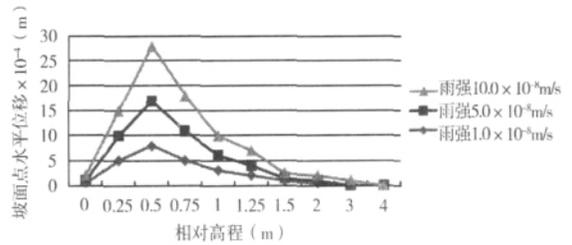


图 10 坡面点水平位移变化曲线

Fig. 10 Curves of horizontal displacement of the slopestaking

分析图10可以得出 ,坡面点最大位移同样也发生在相对高程为0.5m处 ,水平位移主要集中在自坡脚向上1/5坡高范围内 ,其他区域位移很小 ,处于相对稳定。

(3)相同雨强、相同坡度 ,不同土性参数条件下。

以坡度为 27° ,雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例。以魏家沟震区土和粉土为两种不同土性的代表 ,分析坡面点水平位移的变化见图11。

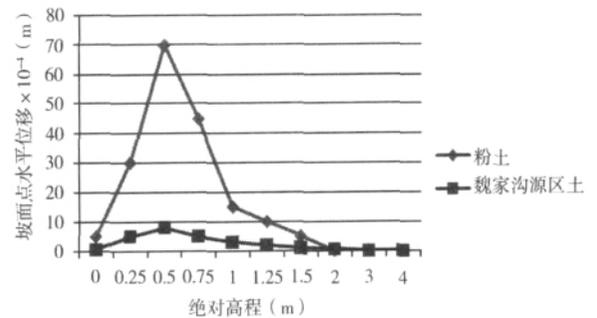


图 11 坡面点水平位移变化曲线

Fig. 11 Curves of horizontal displacement of the slopestaking

从图11可以看出 ,粉土与魏家沟震区土一样 ,坡面点最大位移也发生在相对高程为0.5m左右处 ,并向两边减小 ,位移较大值主要集中在距坡脚1/5坡高这一区域 ,其他区域相对稳定。但是 ,在相同雨强和坡度下 ,在同一相对高程处 ,粉土坡面点水平位移

远比魏家沟源区土坡面点水平位移大得多。说明在其他条件一定时,粉土相对于魏家沟源区土更容易起动。

(4)相同坡度、相同雨强,不同土体饱和度条件下。

以坡度为27°,雨强为 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 为例。魏家沟震区土模型的饱和度分别为0.9和0.6,分析坡面点水平位移的变化见图12。

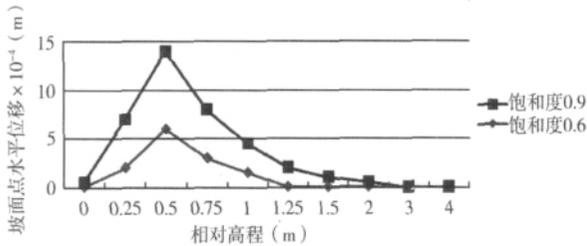


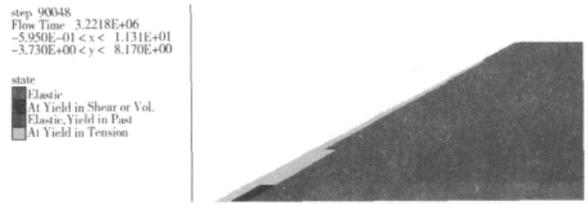
图 12 坡面点水平位移变化曲线

Fig. 12 Curves of horizontal displacement of the slopstaking

分析图12,可以得出,坡面点最大位移同样也发生在相对高程为0.5m左右处,并向两边减小,位移值较大主要集中在距坡脚1/5坡高这一区域,其他区域位移很小。且饱和度越大,土体水平位移越大,越容易起动。

2.3.3 坡体塑性区发展

图13是不同计算条件下塑性区开展的云图,图中颜色最浅区域代表出现拉应力区域,颜色最深区域代表塑性屈服区域。从图中可以看出塑性区最早出现在坡脚附近,并逐渐沿着坡面向上扩展,当坡面出现拉应力时,坡体即将失稳,一旦遇到如降雨、地震等激发作用时,极有可能在拉应力区域出现松动,并带动临近土体起动,形成一种自坡脚沿坡面往上延展,从坡面向里掏蚀的连续性破坏,即坡体出现失稳破坏,在降雨持续作用下,松动土体开始运动并带动周边土体,泥石流可能爆发。



(b)坡角 27°, 雨强 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$, 源区土饱和度 0.6



(c)坡角 27°, 雨强 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$, 粉土饱和度 0.9

图 13 塑性区分布云图

Fig. 13 Plastic zone nephogram

由图13可知,在其他条件一定时,土体饱和度越大,坡脚越容易出现屈服,且塑性屈服区域更大,沿坡面向上拉应力区域发展越快,土体越容易起动且起动后水平位移越大,相同条件下粉土相对于与魏家沟源区土,沿坡面的拉应力区域更大,说明粉土较魏家沟源区土更容易起动且起动后水平位移更大,但魏家沟源区土相比粉土,坡脚处的孔隙水压力较大且更易集聚,因而,魏家沟源区土相比粉土在坡脚处更容易出现塑性区。

3 结 论

(1)通过室内人工降雨模拟试验,得出在该物理模型下,魏家沟震区土泥石流起动的最小临界雨强为 $0.5 \sim 1 \text{mm/min}$ 。

(2)降雨入渗后孔隙水压力的集聚主要在坡脚附近,距坡脚1/5的坡高范围内,且坡脚处孔隙水压力最大,沿着坡面往上逐渐减小。坡面点最大水平位移发生在自坡脚起向上1/8坡高位置处,水平位移值较大的区域主要集中在1/5坡高范围内,其他区域位移很小,相对稳定。随着坡度增加、雨强增大、土体饱和度增大,坡脚附近孔隙水压力增大,水平位移增加,坡体更易失稳促进泥石流的起动爆发。

(3)通过数值模拟塑性区开展试验,可知泥石流在坡脚处最先出现塑性屈服,并沿坡面向上延展,伴随着坡面出现拉应力区域,坡体失稳至破坏,促使泥石流爆发。



(a)坡角27°, 雨强 $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$, 源区土饱和度0.9

参 考 文 献

- [1] 魏永明,谢又予. 降雨型泥石流预报(水石流)模型研究[J]. 自然灾害学报,1997,6(4):48-54(Wei Yongming, Xie Youyu. Study on prediction models of precipitation-typed debris flow[J]. Journal of Natural Disasters,1997,6(4):48-54(in Chinese))
- [2] 崔鹏. 泥石流起动机理的研究[D]. 北京:北京林业大学,1990
- [3] Cui Peng. Studies on condition and mechanism of debris flow by means of experiment[J]. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(9):759-763
- [4] Dai F C, Lee C F, Wang S J, et al. Analysis of rainstorm-included slide-debris flows on natural terrain of Lautau Island, Hong Kong[J]. Engineering Geology, 1991(51): 279-290
- [5] 李永益. 滑坡、泥石流转化机理及其运动特征的研究[C]//滑坡论文选集. 成都:四川科学技术出版社, 1989:69-76
- [6] 戴福初,陈守义,李焯芬. 从土的应力应变特性探讨滑坡发生机理[J]. 岩土工程学报,2002,22(1):127-130 (Dai Fuchu, Chen Shouyi, Li Zhuofen. Analysis of landslide initiative mechanism based on stress-strain behavior of soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 22(1):127-130(in Chinese))
- [7] Iverson R M, Reid M E, LaHusen R G. Debris-flow mobilization from landslides[J]. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 1997(25):85-138
- [8] Iverson R M. The physics of debris-flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296
- [9] Iverson R M, et al. Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials[J]. Science, 246: 796-799
- [10] Major J J, Iverson R M. Debris-flow deposition: effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins[J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, 111(10): 1424-1434
- [11] 戚国庆, 黄润秋. 泥石流成因机理的非饱和土力学理论研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 4-9 (Qi Guoqing, Huang Runqiu. Study on genetic and mechanical analysis of debris flow based on unsaturated soils mechanics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 4-9(in Chinese))
- [12] 陈小念, 孙海洋. 降雨条件下饱和-非饱和土坡的渗流分析[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(24): 115-118 (Chen Xiaonian, Sun Haiyang. Saturated-unsaturated seepage analysis of slope under rainfall[J]. Science Technology and Engineering 2007, 7(24): 115-118(in Chinese))

李 驰(1973-),女,博士,教授。主要从事岩土工程灾害及防治方面的研究工作。

朱文会(1985-),女,硕士研究生。主要从事岩土工程灾害及防治方面的研究工作。

鲁晓兵(1968-),男,博士,副研究员。主要从事滑坡泥石流机理及防治方面的研究工作。

崔 鹏(1957-),男,博士,研究员。主要从事泥石流、滑坡等山地灾害与水土保持方面的研究。