

The Study on Numerical Simulation of Debris Flow Disaster Prevention Engineering Effect in Hongchun Gully, Sichuan Province

Guohui Yang, Shuqin Sun

State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan
Email: 1163160050@qq.com

Received: May 18th, 2016; accepted: Jun. 3rd, 2016; published: Jun. 8th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The study area Hongchun basin is located in the northeast side of Yingxiu Town, which is the 2008.5.12 Wenchuan earthquake epicenter. It is also located on the left bank of the Minjiang River. The ditch and valley pattern is approximate a sector and its area is 5.35 km². The highest point is located in Xin Dian Zi Gou's source; the elevation is 2162.2 m; Mizoguchi and Minjiang River intersection height is 881 m; relative elevation is 1288.2 m; channel longitudinal is 3.6 km; average longitudinal gradient of gully is 357.8 per thousand. It was found in the study that after the Hongchun gully disaster prevention project completed, it has broken twice debris flow in the design condition and once debris flow exceeding the design condition. In order to reasonably judge the effect of the project, we compared the simulation results with the actual operation results of the project. So in the numerical simulation of this article, we selected 2 representative recurrence periods of frequencies ($p = 2\%$, $p = 1\%$) to simulate. At the same time, according to the monitoring data of different sections and by setting up reasonable water gathering point positions in the simulation process, the disaster prevention project is divided into several sections for numerical simulation in this article. The numerical simulation results show that, in the design condition ($p = 2\%$), the Hongchun gully disaster prevention engineering effect is remarkable, and over the design condition ($p = 1\%$) the effect is also good.

Keywords

Hongchun Gully, Debris Flow, Disaster Prevention Effect, Numerical Simulation

红椿沟泥石流治理工程防灾效果数值模拟研究

杨国辉, 孙书勤

成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都

Email: 1163160050@qq.com

收稿日期: 2016年5月18日; 录用日期: 2016年6月3日; 发布日期: 2016年6月8日

摘要

本文研究区为红椿沟流域, 位于2008年5.12汶川大地震震中映秀镇的东北侧, 全流域面积约为 5.35 km^2 , 红椿沟为岷江左岸一级支沟, 在形态特征上呈现长条状扇形特征, 研究区海拔最高点为沟源处望乡石高程为 2169.2 m , 最低点为沟口, 高程 881 m , 全流域的相对高程差达到 1288.2 m 。流域主沟长约 3.6 km , 纵坡率约为 357.8% 。研究中发现, 红椿沟治理工程竣工后, 发生了两次设计工况下的泥石流和一次超标暴雨工况下的泥石流, 为合理判断治理工程数值模拟的防灾效果, 将模拟结果与工程实际运行效果监测数据相比较, 故本文在数值模拟时, 选择具有代表性的2种不同频率的重现周期($p = 2\%$, $p = 1\%$)进行泥石流暴发模拟, 同时根据不同区段的监测数据, 本文在模拟过程中通过合理设置集水点位置, 将治理工程分段进行了防治效果模拟。红椿沟泥石流治理工程在设计工况下($p = 2\%$)的数值模拟中防灾效果显著, 在超标暴雨工况下($p = 1\%$)的数值模拟中抗灾效果显著。

关键词

红椿沟, 泥石流, 防灾效果, 数值模拟

1. 引言

泥石流一般指固液两相流体, 多产生于沟谷或坡面上, 流体中固体物质多为泥砂、石块和巨砾, 总体上呈现为粘性层流或者稀性紊流状态。泥石流产生需要有利的地形条件, 充分的物源条件和一定的水源条件三者结合。在地震烈度较高的山区、构造运动活跃的地区、地质环境复杂地区通常容易发生泥石流。泥石流中含有大量的砂石等固体物质, 影响范围面积较大, 冲刷掩埋的破坏力强, 往往暴发突然, 过程短暂。泥石流运动过程中产生的危害以冲击、侵蚀、淤积、堆埋、堵塞等形式为主。

汶川大地震彻底的破坏了震中映秀的地质环境, 山体裂缝发育加剧, 岩土体结构发生强烈变形和松动, 滑坡、崩塌、泥石流较震前在数量和暴发频率等方面都有增加[1], 2010年8月12日至8月14日, 红椿沟流域内单日降雨量高达 126.8 mm , 这种超越降雨频率的暴雨, 引发了红椿沟大规模的泥石流灾害, 造成岷江河道堵塞, 洪水淹没映秀新区, 泥石流堆积物掩埋了沟口213国道和都汶高速公路, 17人在红椿沟泥石流中失踪, 损失十分惨痛。泥石流发生后, 政府组织有关单位和组织对红椿沟泥石流进行了综合治理, 上游采取固源防堵工程, 通过稳源固坡、堵点控制, 使大量坡面及沟道物源不能启动; 中游采取调控减势工程, 分级拦挡调节削峰减势, 使“大”泥石流转化为“小”泥石流, 实现了规模控制; 下游采取固床排导槽引导洪水入江。

在过去几年的雨季里, 暴雨诱发了红椿沟多次泥石流地质灾害, 通过多次实地调查, 红椿沟既有防治工程在历年的泥石流地质灾害中, 起到了较好的防灾效果。通过调查发现, 目前地震灾区的大量地质

灾害治理工程采用了 50 年一遇的设计标准, 如果发生超标降雨频率下的泥石流灾害, 泥石流威胁沟口及堆积区人类工程的可能性存在, 针对这种情况, 开展红椿沟泥石流治理工程在超标降雨频率下泥石流暴发的防灾效果数值模拟研究是十分必要的。

2. 红椿沟泥石流特征及形成条件分析

2.1. 流域特征

本文研究区为红椿沟流域, 如图 1 所示, 全流域面积约为 5.35 km², 在形态特征上呈现长条状扇形特征, 研究区海拔最高点为沟源处望乡石高程为 2169.2 m, 最低点为沟口, 高程 881 m, 全流域的相对高程差达到 1288.2 m。流域主沟长约 3.6 km, 纵坡率约为 357.8‰, 研究区的沟谷形态呈现为典型的山区

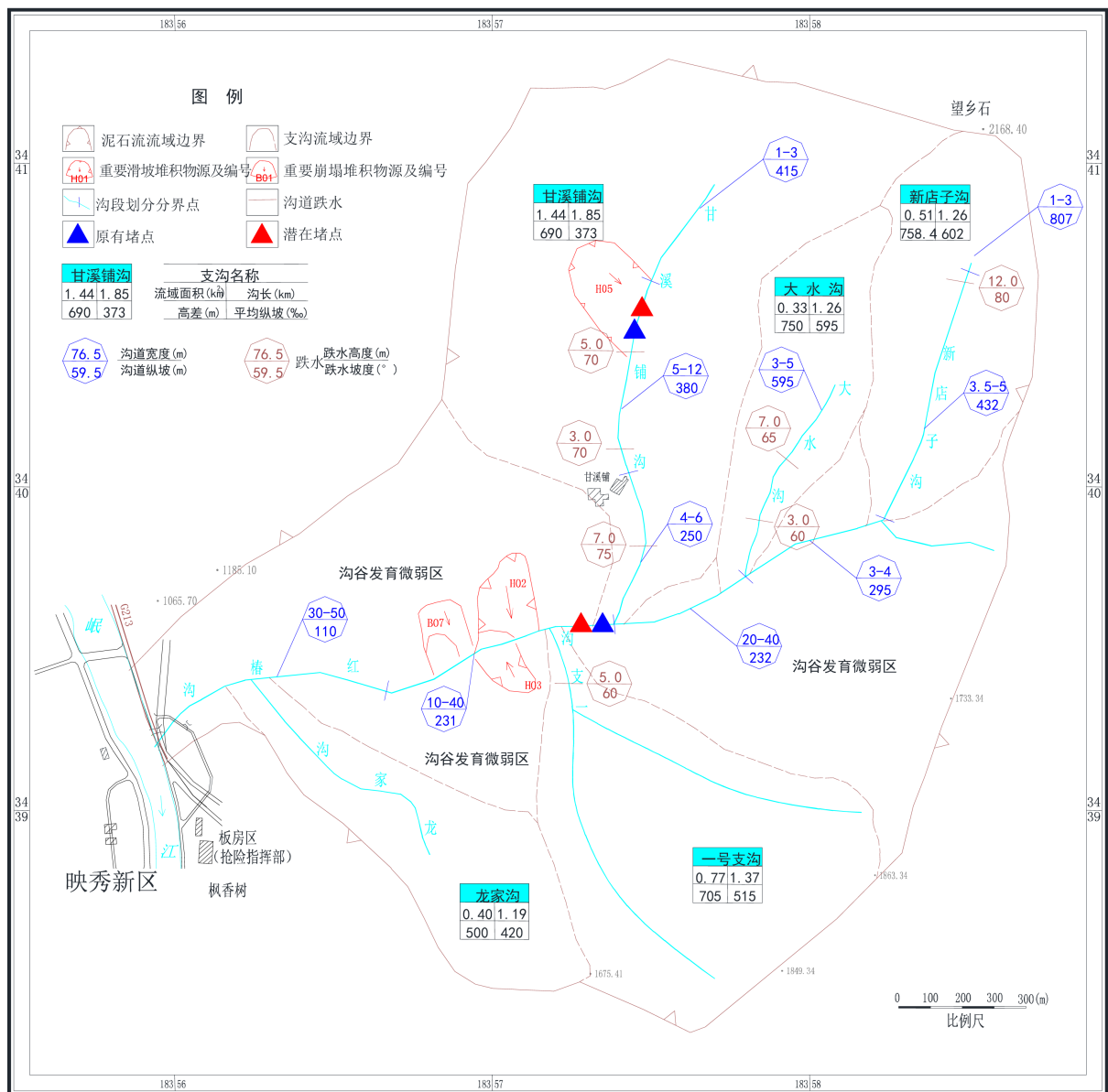


Figure 1. Hongchun gully hydrographic net figure

图 1. 红椿沟水系图

河流下切 V 型谷, 由于地处地质构造活跃区, 沟道内的跌坎发育较多, 整体为强烈抬升构造特征。在 5.12 汶川地震后, 沟谷地形剧烈变化, 沟道内松散堆积物含量大大增加, 造成了沟道严重堵塞, 物源范围较地震之前成倍增加。流域内地形陡峻, 覆盖于坡体表层的松散岩土体和岩石节理裂隙高度的发育, 在强烈的剪切应力作用下, 被切割成碎块, 成为震后次生崩塌、滑坡地质灾害隐患。

红椿沟水系总体上看, 呈现出树枝状分布, 主沟道的右岸发育 3 条支沟分别为新店子沟、甘溪铺沟、大水沟, 主沟道的左侧则发育有龙家沟等支沟。主沟右岸的三条支沟内, 震后次生地质灾害现象发育多, 形成了大量的松散固体物源堆积于坡面和支沟沟床中, 非常丰富, 整个流域的右侧是泥石流物源主要集中分布区域, 也是泥石流形成的主要诱发区域; 主沟的左岸各支沟内的植被十分茂密, 山体结构在地震中破坏较小, 不良地质现象和隐患发育较少, 以零星的坡面侵蚀物源分布为主, 无大量的松散固体物源存在, 支沟内的流体固体物质含量小, 泥沙比小, 重度小。故以下重点描述对泥石流产生和暴发起重要作用的右岸三条支沟的沟道条件。

1) 甘溪铺沟

支沟甘溪铺沟是流域面积达到 1.44 km^2 的一条大支沟, 支沟的流域形态呈长条椭圆状。支沟长度约为 1.85 km , 沟源位置的分水岭部位高程值为 1870 m , 支沟沟口高程值为 1180 m , 相对高程差值达到 690 m , 甘溪铺沟平均纵坡率为 373% 。

通过现场调查, 甘溪铺支沟的沟道上游部分地形险要, 地势陡峭, 其山体坡度大于 30° , 基岩出露的部位多在临空面, 表层的覆盖层较薄, 灌木草丛植被覆盖率较高, 仅有少量零星崩塌小碎块石发育, 无松散物存在于沟道上游, 该段属于泥石流清水区。

甘溪铺支沟的沟道中游部分地形也十分陡峻, 支沟中游的右岸上部呈现陡岩悬崖地貌, 山体坡度在 50° 左右, 山体的覆盖层也比较薄弱, 灌木草丛等植被发育情况较好, 调查发现, 由于坡度大, 临空面陡峭, 在汶川地震影响下, 破碎的岩体造成了崩塌的发育, 植被生态破坏较严重, 在坡脚部位崩塌堆积体大量存在, 坡度达到 30° , 下部的斜坡体的结构变得松散, 低矮的灌木和草丛覆盖, 2010 年“8.14”泥石流发生后, 该区域的滑塌和拉槽下切作用明显, 沟道原始地形破坏严重, H05 崩滑堆积体成为了“8.14”泥石流暴发的主要启动物源, 甘溪铺支沟的沟道中游左岸为陡坡地貌, 山体的坡度约 40° , 主要为基岩分布, 几乎没有覆盖层, 崩滑地质现象不发育, 能够参与泥石流活动的物源量极少, 沟道和坡面流体接近清水流状态, 容重相对较小。

甘溪铺支沟的沟道下游部分是冰水堆积物形成的台地, 台地宽度约为 350 m , 沿沟道顺向长度约为 450 m , 地形较为平缓开阔, 台地向下游主沟方向倾斜, 倾角约为 10° , 沟道内的陡坎结构较为的松散, 滑塌相对发育, 台地后侧地貌为陡坡, 大量的基岩出露, 表层的覆盖层很薄, 灌木植被发育, “5.12”汶川地震引发的该区段的崩塌地质灾害较为发育, 沟道内物源量较多。

2) 大水沟

大水沟是研究区内主沟右侧三条支沟中流域面积最小的一条支沟, 其面积为 0.33 km^2 , 流域的平面形态呈现条带状特征, 支沟长度 1.26 km , 支沟沟源最高处海拔高程值为 2030 m , 支沟口高程值 1280 m , 相对高程差值为 750 m , 大水沟平均纵坡率高达 595% 。

大水沟的地形地貌陡峭, 沟谷属深切 V 形谷, 支沟两侧的岸坡坡度大于 30° , 流域内斜坡坡体表层覆盖大量第四系冰水堆积物, 坡脚部位受沟道侧蚀作用影响强烈, 在大水沟的下游部分, 受流体揭底作用影响强烈, 沟床中基岩出露不可见, 大水沟沟道内和两岸坡体上松散堆积物较多, 物源量巨大。

3) 新店子沟

主沟右侧的第三条支沟为新店子沟, 其面积为 0.52 km^2 , 新店子沟流域平面形态呈长条带形, 沟道

长度为 1.27 km, 沟源位置最高点海拔高程值为 2169.2 m, 支沟沟口的高程值为 1410 m, 相对高程差值为 759.2 m, 新店子沟的沟道平均纵坡率高达 598‰。

新店子沟整体地形陡, 纵坡降大。沟道上游坡度在 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 基岩分布在这个区段, 表层覆盖层的厚度很小, 松散的堆积物含量少, 植被覆盖好, 在部分临空面高度发育的部位, 崩塌隐患点发育, 崩积物沿山体向下运动, 随着坡面侵蚀进入沟道中, 形成少量的活动物源, 新店子沟中下游发育有古老冲洪积扇, 堆积形成的扇体平坦而宽缓, 沟道内的流体随着流量的变化流动方向在堆积扇上发生不同程度的变化, 新店子沟沟道右岸受流体侵蚀强烈, 冲刷作用明显。

2.2. 形成条件

研究区流域地形总体上呈现陡峭的中-高山侵蚀峡谷地形, 十分有利于地表水的汇集, 且红椿沟主沟和支沟的坡度很大, 且顺沟道向下纵坡率逐渐降低, 沟谷宽度同样呈现顺沟道向下逐渐变宽, 因此, 从流域地形的角度分析可知, 研究区输送固体物质的条件优越, 水动力条件良好。通过对研究区沟道形态的分析, 因整个流域面积十分宽广, 各支沟的面积和沟长各不相同, 降雨发生时, 汇入主沟的洪峰在时间和空间上呈现异步的状态。沟源区和红椿沟左岸斜坡区覆盖层薄, 有利于降雨形成地表径流, 而中下游覆盖层发育的地区则降雨转化成径流的数量相对减少, 这种沟源区形成径流, 决定其水动力条件往往较强, 而中游径流补给相对缓慢, 决定其径流时间可能相对较长。

红椿沟植被分布特征表现为: 上游新店子沟、大沟和红椿沟左岸、甘溪铺沟沟源地区等植被覆盖率较高, 仅局部崩滑区对植被造成了一定程度的破坏, 沟道泥石流冲击破坏了少量植被; 红椿沟中下段右岸和甘溪铺沟中下段植被覆盖率相对较低, 以灌丛为主, 甘溪铺台地附近有少量耕地分布。

红椿沟泥石流物源启动条件, 符合一般性泥石流物源启动的规律, 即物源启动由内外条件两个方面共同决定。内在条件一般指物源的密实度和胶结度、沟道条件、地形纵坡等; 外在条件指降雨强度和流体冲刷强度。

内在条件, 现场调查可知, 研究区三大类物源中, 易启动部分的共同点是结构松散、固体物质间无胶结, 在水流作用下极易参与泥石流活动, 成为泥石流物源的补给。红椿沟现存物源点在部分的稳定性都较差, 未被压实, 也未发生固结。而流域内的地形陡峭, 山体坡度大, 沟道纵坡率大, 水流落差大, 故流域内的物源点具备参与泥石流活动的内在启动条件。

外在条件, 调查发现, 红椿沟泥石流暴发除了受物源量大控制以外, 强降雨是其暴发泥石流的主要外在诱发因素。研究区在近几年 4 次泥石流活动中, 都是在强降雨之后突然发生, 而且都发生在雨季, 因此降雨是诱发泥石流的主要外在因素, 降雨后, 有利的地形汇水条件使水流迅速汇集, 在沟道中形成强烈的冲刷、侵蚀、侧蚀、拉槽、下切等作用, 物源点上无胶结、结构松散的固体物质迅速参与到泥石流活动中, 强降雨在坡面和沟道内源源不断的产生水流, 水流加剧对坡面、沟道、坡体等松散堆积物的冲刷, 使更多的物源补给进入洪水形成泥石流。因此红椿沟泥石流具备物源启动的外在条件。

综上所述, 研究区暴发泥石流的物源启动条件是: 物源点存大量无胶结、结构松散的固体物质, 流域内的地形陡峭, 山体坡度大, 沟道纵坡率大, 水流落差大, 在强降雨作用下, 坡面和沟道内源源不断的产生水流, 水流加剧对坡面、沟道、坡体等松散堆积物的冲刷, 伴随水流冲刷作用, 各类物源失稳启动进入流体, 最终形成大规模的泥石流。

3. 工程防灾效果数值模拟

本文以红椿沟泥石流为研究对象, 根据监测数据、野外实地调查数据、室内实验数据以及国内外学术刊物公开发表的有关红椿沟泥石流灾害的论文为基础资料, 建立研究区数值模拟模型进行数值模拟。

3.1. 模拟理论基础

FLO-2D 是由 O'Brien [2]通过对泥石流的系统研究而提出的二维洪水和泥石流数值模拟软件,该软件使用 FLO-2D 模型,可广泛的应用于泥石流地质灾害预测模拟、沟道河流洪水管理、抗洪防灾工程风险设计、泥石流和土石流等领域,FLO-2D 软件能够较为精确的模拟出流体的流动速度和流体的堆积深度,在此基础上,可以预测流体的堆积区域、淹没面积、预估灾害危险区范围等,为防灾减灾工程效果的检验提供数值模拟理论的支持。FLO-2D 软件运用了剪应力与剪切应变率为非线性变化的非牛顿流体模型,同时也运用了根据有限差分法求得的泥石流流体运动控制方程,从而模拟出泥石流流体在水平和垂直方向的流速和深度。本文的研究中,主要考虑如下的三个控制方程式:

3.1.1. 连续方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} \quad (1)$$

在式(1)中, h 为泥石流流体的流动深度, I 为水力坡降, u 代表流体在水平方向上的平均流速, v 代表流体在垂直方向上的平均流速。

3.1.2. 运动方程式

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial x} - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

其中 S_{fx} 及 S_{fy} 代表摩擦坡降, S_{ox} 及 S_{oy} 代表沟床坡降, 式(2)和式(3)是代表动力平衡的动量方程。

3.1.3. 流变方程式

O'Brien 在 1985 [3]年提出应用于高含沙量和泥石流的流变方程:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (4)$$

在(4)式中 τ_c 代表凝聚型屈服应力; τ_{mc} 代表 M. Coulomb 剪应力; τ_v 代表粘滞剪应力; τ_t 代表紊流剪应力; τ_d 代表扩散剪应力。

3.2. 模拟方法

在数值模拟研究前期收集了红椿沟地区 1:10,000 等高线和高精度遥感影像图。模拟一般步骤可分为:获取 DEM: 加载修正高程后的等高线于 ArcGIS 软件,使用三维分析工具创建特征三角网,然后将不规则三角网通过栅格化工具,生成研究区的 DEM 数字高程模型,考虑到本次模拟中流域范围较大,在获取 DEM 时,采用了分区域获取的方式,以减少后期单次数值模拟的时间和容错能力。

ASCII 编码格式文件转化: 由于在向 FLO-2D 导入地形数据的时候,需要将文件编码格式软化为 ASCII 编码,故本文采用了 ArcGIS 软件当中的转换工具箱的功能来将原始 DEM 进行文件格式的转换,从而得到 FLO-2D 可用的 ASCII 编码格式文件。

开始数值模拟时,应该首先新建工程项目,将 ASCII 编码格式文件导入,然后对红椿沟的地形进行计算格网的精度划分,加载需要模拟的每一个流域区段的边界 shape 文件对红椿沟泥石流的单次模拟范围进行划分,从而确定模拟的计算范围,最后对加载边界条件后的确定计算范围进行高程赋值,通过以上步骤,在数值模拟软件中的数字高程模型的每一个计算格网都对应一个确定的高程值。

3.3. 模拟精度参数选取与注意事项

FLO-2D 数值模拟算法精度的关键影响参数, 包括研究区泥石流的重度、流量、体积浓度、曼宁系数、流量过程线等。

其中, 重度计算在本研究中采用多次现场实验求取平均值的方式来进行; 流量由监测数据和流域面积求得; 泥石流体积浓度表示流体中固体物质体积与流体总体积的比值, 一定程度上决定了流体中颗粒的力学关系, 从而在一定程度上决定了泥石流流体的运动和堆积特征, 在数值模拟中, 体积浓度是决定模拟结果准确与否的重要影响因子之一; 曼系数代表地表的粗糙程度, 也是影响模拟精度的参数之一, 根据现场调查情况, 本文取其值为 0.1; 流量过程线由监测数据通过典型洪水过程放大法求解。

特别指出的是, 在对数字高程模型进行计算网格的划分时, 网格大小决定了模拟精度和模拟时间, 划分网格精度过大计算量成几何倍数增加, 计算时间很长, 划分网格精度过小, 计算时间变短, 但模拟结果的准确性会受到影响, 不能完整的反应泥石流的暴发情况。通过多次试验调整, $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的方格网划分, 既能兼顾效率, 又能较合理的满足模拟需要, 故本文研究中采用了 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的方格网划分数字高程模型。

在 FLO-2D 软件中进行数值模拟, 需要满足以下假设和限制条件:

假设条件: 假设泥石流流体中水压分布为静水压力分布状态; 假设流体稳定均匀的流动在计算步长之间; 假设流体满足其粘滞系数方程式; 假设每个格网高程及参数取值唯一; 假设同一网格的粗糙度等参数不变。限制条件: 限制 FLO-2D 软件模型中沟道沟底固定不发生变化; 限制泥石流的涌浪现象不能被模拟; 限制模拟过程中无新物源, 提前设计好模拟集水点的流量过程线。

3.3. 治理工程分布

在红椿沟治理工程体系中, 上游三条支沟设计修建了 4 座拦砂坝, 15 座谷坊坝和一条固底槽对支沟物质进行稳拦和固底; 主沟的沟道中游修建了 4 座较高的格拦坝对支沟下泄物和工程区物源进行稳拦。其中, 1、2#格拦坝针对主沟拉槽下切深度大、揭底冲刷范围广的特点, 设计采用了 20 米高坝结合桩基承台结构; 沟道下游修建了排导槽, 并把无害洪水顺利导入岷江[4]。全流域治理工程体系分布图见图 2 所示。

3.4. 数值模拟

在准备工作完成后, 将红椿沟泥石流的治理工程以插件的形式添加到模拟工程中去, 并通过修改坝体属性将每道坝的参数导入模拟工程文件当中, 模拟环境与坝体设计窗口如图 3 所示。各项数据处理计算完毕后, 开始模拟计算工作。 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的方格网精度下, 由于大量治理工程的添加, 泥石流流体深度势必增加, 模拟计算量相应增加, 模拟时间将大幅增长, 受模拟硬件性能的限制, 每次模拟的计算时间达到 30~50 小时, 加上前期数据计算处理的准备工作和模拟过程中调试重启工作, 完成 1 次模拟的时间达到 150 小时以上。

本文在红椿沟泥石流治理工程防灾效果数值模拟中, 把红椿沟分为上游、中游、下游、三个区段, 在每一个区段中, 选取 50 年一遇($p = 2\%$)、100 年一遇($p = 1\%$) 2 种工况进行模拟。共进行 6 次数值模拟, 以下图件为模拟结果。

红椿沟上游治理工程防灾效果数值模拟结果参见图 4 和图 5, 通过模拟过程和结果分析, 因为红椿沟治理工程的作用, 泥石流在运动过程中, 首先在各级坝体位置发生堆积, 回淤, 当流体深度接近坝体高度时, 流体向下游流动, 沟道内的淹没范围受坝体作用明显增加, 但流体的流动速度受坝体阻挡流速降低。

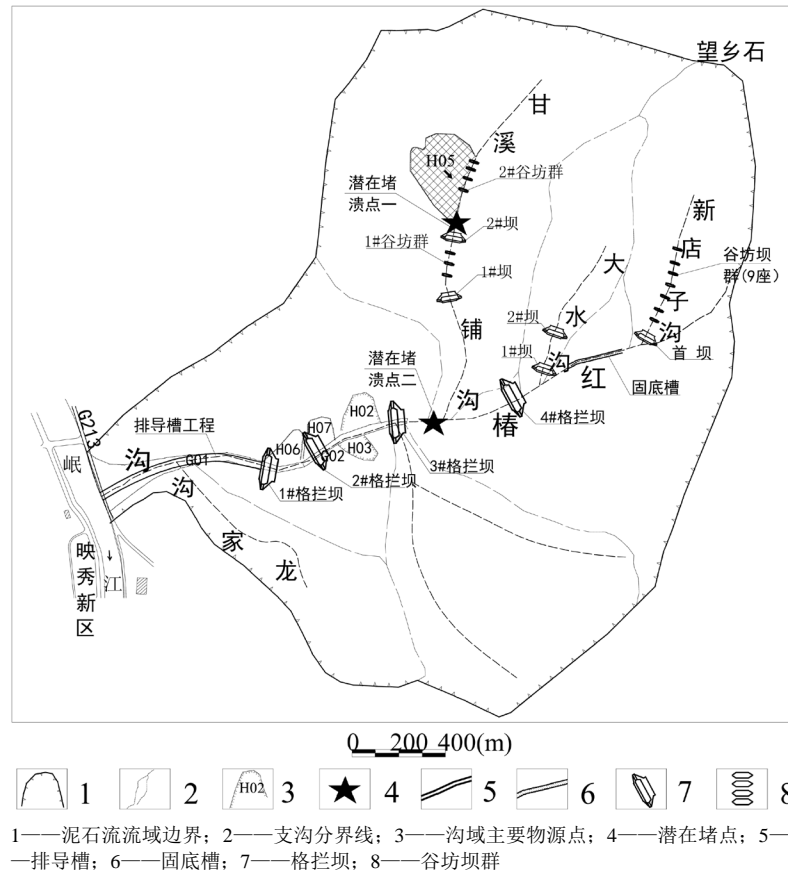


Figure 2. Debris flow disaster prevention engineering distribution charts in Hongchun gully
图 2. 红椿沟泥石流治理工程分布图

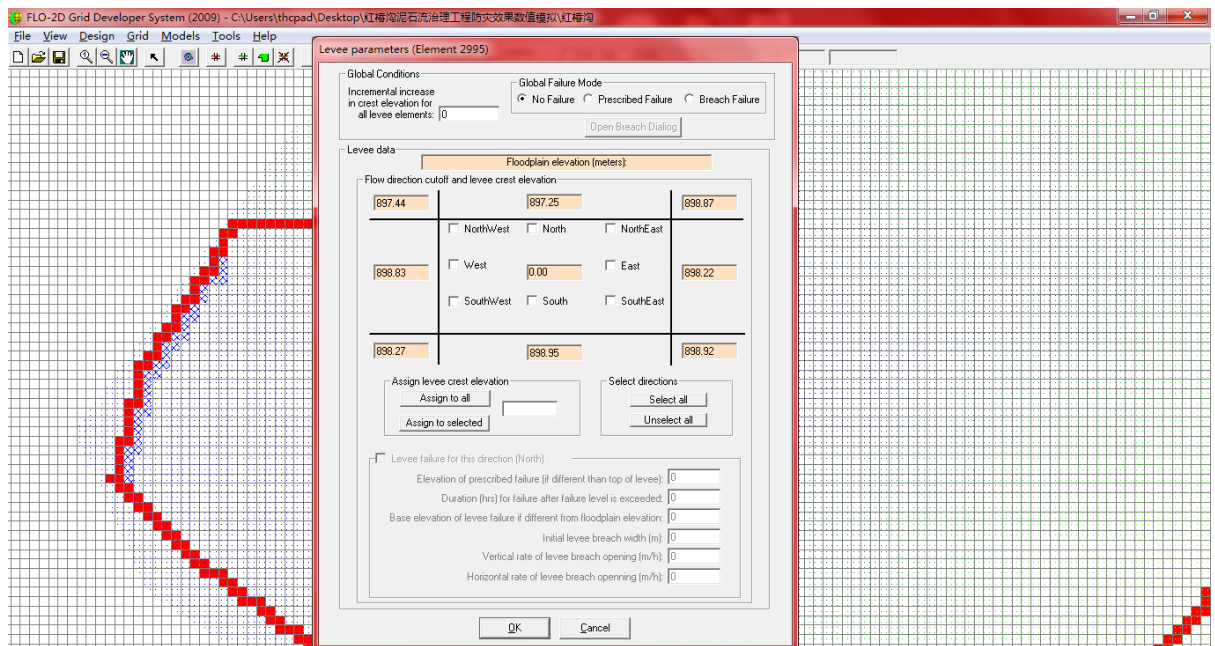


Figure 3. Simulation software dam design window
图 3. 模拟软件坝体设计界面

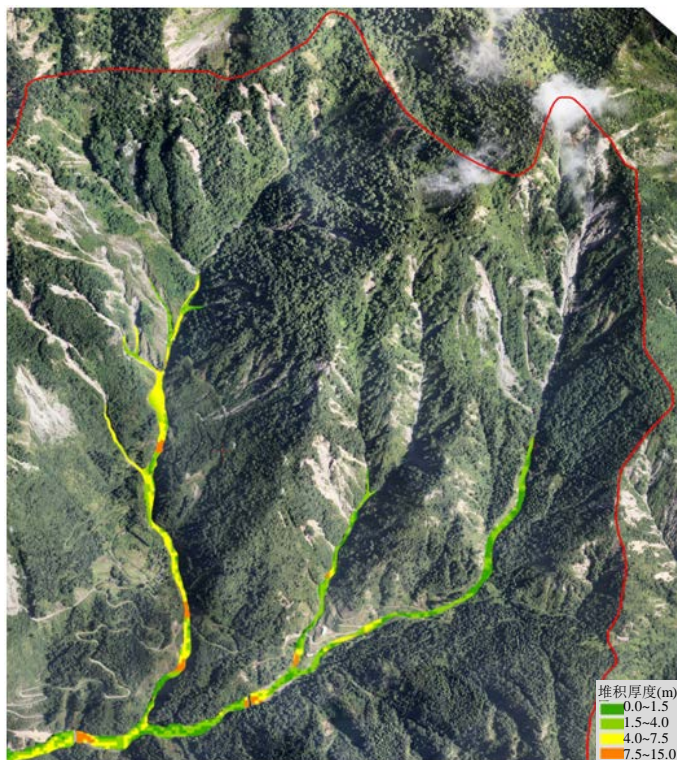


Figure 4. Numerical simulation results of Hongchun gully upstream in the design condition
图 4. 设计工况下红椿沟上游治理工程数值模拟结果

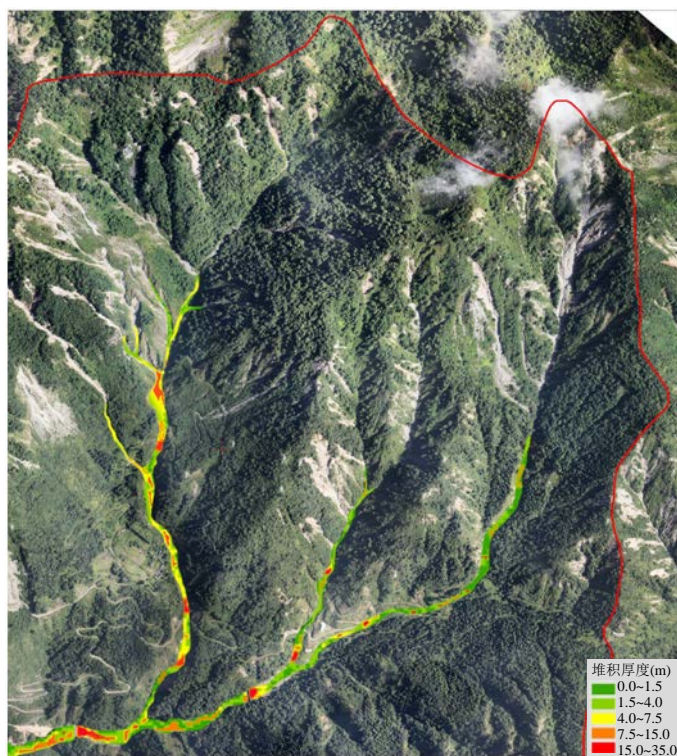


Figure 5. Numerical simulation results of Hongchun gully upstream exceeded the design condition
图 5. 超标工况下红椿沟上游治理工程数值模拟结果

在红椿沟上游右岸的三条支沟沟道内, 所设坝体工程对泥石流的拦挡作用明显, 模拟显示, 无论是设计工况下还是超标降雨工况下, 红椿沟上游工程拦挡效果显著。稳固、减少了物源向中下游启动, 控制、预防了堵点的形成。

红椿沟中游治理工程数值模拟结果参见图 6 和图 7, 由模拟过程和结果分析可知, 在设计降雨频率下, 中游沟道内所设的 4 座坝拦挡坝工程对泥石流的拦挡作用十分显著, 模拟显示沟道内固源范围符合工程设计目标, 在设计工况下的泥石流模拟中红椿沟上游工程拦挡固源效果显著。稳固、减少了物源启动, 控制、预防了堵点的形成。强降雨引发泥石流时, 中游未出现堵溃及大规模固体物质启动, 进入下游排导槽区物质以细颗粒为主, 排放总量受控; 通过中游区拦挡、调节控制工程作用, 工程防治效果好。

红椿沟下游治理工程数值模拟结果参见图 8 和图 9, 通过模拟过程和结果分析可知, 对红椿沟流域沟道下游全部设计了排导槽, 故沟道通过能力大大提高, 泥石流流体在超标降雨频率下($p = 1\%$), 流速降低, 流体无堆积, 通过排导槽进入岷江, 无堵江危害的流体入江, 形成堆积扇的扇体范围小, 没有造成岷江的堵塞, 红椿沟下游固床排导工程在设计工况和超标降雨工况下的泥石流模拟中均防灾减灾效果显著。



Figure 6. Numerical simulation results of Hongchun gully midstream in the design condition
图 6. 设计工况下红椿沟中游治理工程数值模拟结果



Figure 7. Numerical simulation results of Hongchun gully midstream exceeded the design condition
图 7. 超标工况下红椿沟中游治理工程数值模拟结果



Figure 8. Numerical simulation results of Hongchun gully downstream in the design condition
图 8. 设计工况下红椿沟下游治理工程模拟结果



Figure 9. Numerical simulation results of Hongchun gully downstream exceeded the design condition
图 9. 超标工况运行时红椿沟下游治理工程数值模拟结果

4. 结论

泥石流的运动和堆积受到所在流域综合因素的影响和控制, 降雨频率和流域地形等是不可控的参数因子; 物源启动量、沟道通畅度、泥石流流速、泥石流重度等是可人为控制的因子, 通过在流域内建设治理工程, 可以有效的改变影响泥石流危险性的人为可控参数因子, 从而有效的降低泥石流的危险性和危害性, 所以治理工程的有效性是衡量泥石流治理工程的重要评价指标。

数值模拟结果显示, 上游三条支沟沟道内, 所设坝工程对泥石流的拦挡作用明显, 沟道内固源范围符合工程设计目标根据数值模拟结果; 中游梯级坝设坝位置, 粒径大的块石固体物质淤积于坝后方库容区内, 粒径小的泥沙随洪水流入下部沟道, 梯级坝流量调节作用明显, 对泥石流的重度调节作用明显; 下游固源区基本无固体物质启动, 在排导区基本无泥石流固体物质堆积, 红椿沟泥石流治理工程在泥石流数值模拟中防灾减灾效果显著。

在汶川地震和芦山地震后, 四川龙门山一带地震影响范围内的山区中, 滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害频繁发生, 短期内剧烈增加了数量庞大的松散堆积物, 绝大部分存在于斜坡坡体和山区沟道中, 构成大量的泥石流物源, 震区山体坡面覆盖层发生松动, 大量岩体结构破碎加剧, 在突发暴雨作用下, 进一步引发生了大量崩塌和滑坡, 松散物源量加大, 为泥石流的暴发提供了客观条件, 现各地质灾害治理工程的设计标准, 大多采用了 50 年一遇降雨频率的设计指标, 如果发生超标降雨频率时, 泥石流地质灾害对流域的影响依然存在。目前除了运用数值模拟手段外, 没有更直接和经济的方式对泥石流防灾减灾工程的效果进行检验, 随着大量泥石流治理工程的兴建, 进一步研究泥石流治理工程防治效果和泥石流灾害的影响很有必要, 具有较高的社会效益和经济效益。

参考文献 (References)

- [1] 唐川, 铁永波. 汶川震区北川县城魏家沟暴雨泥石流灾害调查分析[J]. 山地学报, 2009, 27(5): 625-630.
- [2] O'Brien, J.S. (2009) FLO-2D Users Manual Version 2009. FLO-2D Software Inc., 10.
- [3] O'Brien, J.S., Julien, P.Y. and Fullerton, W.T. (1993) Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, **119**, 244-261.
- [4] 李德华, 许向宁, 吉峰, 等. 汶川县映秀镇红椿沟特大泥石流工程防治及初步效果分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 260-268.