

基于三维遥感系统的泥石流土石量 计算及影响范围模拟

谢谟文,刘翔宇,王增福,胡 嫻

(北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083)

摘要:结合三维遥感影像解译提出一种定量的泥石流土石量计算方法。在泥石流汇水区内对地形进行 0 次谷与 1 次谷划分,按可搬运的物质总量和一次降雨所能搬运的物质总量两种方式进行分析,使计算结果更加精细化;以数字高程模型(DEM)与降雨所搬运的土石总量作为影响范围模拟的基础,利用 GIS 空间分析功能分析泥石流汇水区的横截面面积及区域平面面积等地形参数,判别土石产出量与地形参数关系,实现泥石流影响范围的模拟。分析结果可为潜在泥石流危险区域评价预测提供参考。

关键词:泥石流土石量;降雨量;遥感;GIS;地形分析

中图分类号:P642.23;P694

文献标识码:A

文章编号:1000-3665(2011)03-0115-06

泥石流是发生在山区的一种常见地质灾害。其爆发来势汹涌,饱含的大量泥沙石块、巨砾严重威胁到人民的正常生活和人身安全。泥石流灾害的发生明显受地形、地质和降雨条件的控制。山区沟谷的自然环境为泥石流的产生提供了有利的地形条件。泥石流可能土石量的计算方法大多以清水流量中配土石含量的配法为主,还可以流域内可能存在的物质总量和降雨可能带走的物源量分别计算。在地质灾害发育区域,泥石流的物源不仅来源于表层松散堆积、坡积物,还应考虑崩塌、滑坡等灾害可能引起的泥石流物源。

对泥石流搬运的土石量所产生的影响范围,国内外学者进行了积极的研究,取得了一些成果。池谷浩等根据流域面积推算泥石流冲出量以及泥石流堆积长度和堆积宽度,预测泥石流的危险范围^[1]。高桥堡^[2]和水山高久^[3]等开展泥石流堆积过程和堆积范围的模型实验,首次建立了泥石流危险范围预测的数学模型。刘传正^[4]通过总结国内外经验和认识,将地质灾害区域预警原理进行划分,为我国预警体系提供了技术路线。目前,大部分研究路线是从致灾条件的统计分析出发或根据实验室模拟结果进行预测评价,其成果虽然便于实际应用,但往往依赖于专家经验,缺乏理

论依据;另一部分从建立泥石流运动数学模型出发,运用计算机等现代技术手段进行模拟评价,其成果具有较坚实的理论依据,无疑具有广阔的应用前景,但因泥石流运动堆积过程复杂,目前尚没有成熟的计算公式和模型,仍处于不断的探索之中。

本文基于三维地形遥感影像解译确定泥石流的汇水区、流通区及堆积区,在地形上引入 0 次谷和 1 次谷概念,建立泥石流土石量的定量分析方法;将三维遥感影像提取的 DEM 和降雨可能搬运的土石量作为影响范围预测的基础,采用 GIS 的水理解析功能确定地形参数,从而进行影响范围分析。以四川省某泥石流沟为实例,实现了基于三维遥感影像系统的泥石流土石量及影响范围分析方法,分析结果可为潜在泥石流危险区域预测提供参考依据。

1 泥石流土石量计算方法研究

本文在地形上引入 0 次谷与 1 次谷概念,即在大比例尺的等高线地形图中,当谷口宽度 a 大于沟谷深度 b 时,为 0 次谷,反之为 1 次谷(图 1)。0 次谷中土石量主要堆积于山体两侧,泥石流发生时,土石主要以崩落、滑塌的形式落下,聚集于山谷中流向谷口;1 次谷的土石量主要堆积在河谷的河床上,泥石流发生时,河谷中堆积的土石直接被流体带走。

1.1 流域内可能存在的土石量

泥石流危险区域内可能存在的土石量主要源于 0 次谷或 1 次谷的贡献,其次为崩塌、滑坡等不良地质体可能引入的土石量,具体计算为:

收稿日期:2010-06-13;修订日期:2010-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40972229)

作者简介:谢谟文(1965-),男,教授,博士生导师,从事地质灾害、GIS 与遥感应用及信息系统开发、环境岩土工程、防灾减灾等研究工作。

E-mail:huahua1209@163.com

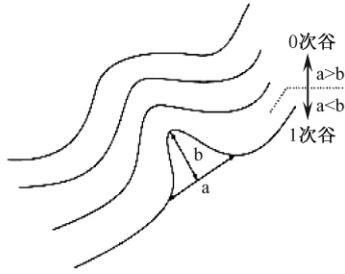


图1 0次谷、1次谷的地形

Fig.1 0-time valley terrain and 1-time valley terrain

$$V_{dy1} = V_{dy11} + V_{dy12} + V_{dy13} \quad (1)$$

式中: V_{dy1} ——泥石流沟内可能存在的土石量(m^3);

V_{dy11} ——1次谷河床中可能移动的土石量(m^3);

V_{dy12} ——0次谷中可能移动的土石量(m^3);

V_{dy13} ——不良地质体引入的土石量(m^3)。

对于1次谷河床中可能移动的土石量 V_{dy11} , 其计算公式为:

$$V_{dy11} = B_d \times D_e \times L_{dy11} \quad (2)$$

式中: L_{dy11} ——1次谷的长度, 图2为取值示意图;

B_d ——泥石流侵蚀的平均河床宽度;

D_e ——泥石流侵蚀的平均河床深度。

二者取值是根据现场调查附近河谷的断面、冲刷状况、倾角、坡岸堆积物以及植被的发育情况等推定的, 图3为侵蚀宽度和侵蚀深度取值示意图。

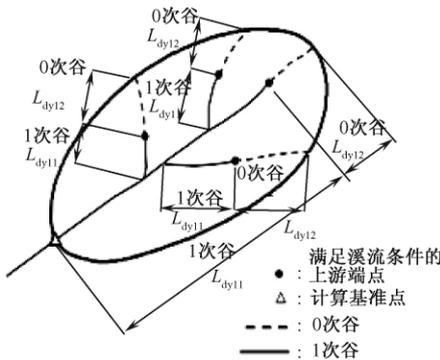


图2 L_{dy11} 取值示意图

Fig.2 Schematic diagram of L_{dy11} and L_{dy12}

地形、地质特征和已存在的崩塌、滑坡分布情况是调查0次谷中可能移动土石量 V_{dy12} 的主要参考依据, 可根据发生的具体位置、面积、破坏深度等推定。0次谷土石量的计算采用式(3):

$$V_{dy12} = \sum (B_d \times D_e \times L_{dy12}) \quad (3)$$

式中: L_{dy12} ——0次谷的长度, 取值方法见图2。

对于汇水区内崩塌、滑坡、崩坡积体等不良地质体

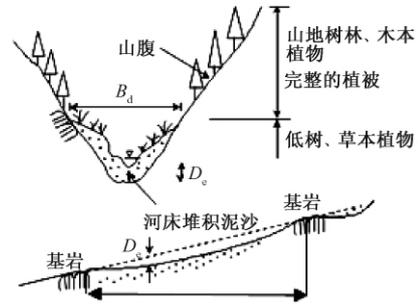


图3 侵蚀宽度、侵蚀深度的取值方法

Fig.3 Value determining method of erosion width and erosion depth

可能引入的土石量 V_{dy13} , 采用式(4)计算:

$$V_{dy13} = A \times D \times \varphi \quad (4)$$

式中: A ——崩塌、滑坡等不良地质体的面积(km^2);

D ——不良地质体平均厚度(m), A 与 D 的取值根据经验及现场勘查报告;

φ ——折减系数, 一般取20%。

1.2 一次降雨所搬运的土石量

水既是泥石流的重要组成部分, 又是泥石流的激发条件和搬运介质(动力来源)。我国泥石流的水源主要是暴雨、长时间的连续降雨及融雪等。在计算某一降雨量下所能搬运的土石量之前, 需要先把计算区域内的泥石流进行类型分区, 分为沟谷泥石流和坡面泥石流。对于两种泥石流采取不同的方法计算, 最后再算出土石量总和, 计算公式如下:

$$V_{dy2} = V_{dy21} + V_{dy22} \quad (5)$$

式中: V_{dy21} ——沟谷泥石流流量;

V_{dy22} ——坡面泥石流流量。

(1) 沟谷泥石流流量计算

沟谷泥石流流量在某一降雨量下所能搬运的土石量以式(6)计算:

$$V_{dy21} = \frac{10^3 \cdot P_p \cdot A}{1 - K_v} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} \right) K_{r2} \quad (6)$$

式中: P_p ——24小时降雨量;

A ——流域面积;

C_d ——泥沙浓度;

K_{r2} ——流出补正率, 取0.1~0.6;

K_v ——泥沙孔隙率, 一般取0.4左右。

其中,

$$K_{r2} = 0.05 (\log A - 2.0)^2 + 0.05 \quad (7)$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \varphi - \tan \theta)} \quad (8)$$

式中: σ ——砂的密度, 一般取2600kg/m³左右;

ρ ——水的密度(含泥沙),取 $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$;
 φ ——河床堆积泥沙的内摩擦角,取 35° ;
 θ ——河床的倾角。

泥沙浓度大小在 0.30 到 $0.9C_*$ 间,即:

$$C_d = \begin{cases} 0.30 & (C_d < 0.30) \\ \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \varphi - \tan \theta)} & (0.3 < C_d < 0.9C_*) \\ 0.9C_* & \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_* ——河床堆积泥沙的堆积浓度(0.6 左右)。

(2) 坡面泥石流流量计算

坡面泥石流流量在某一降雨量下所能搬运的土石量计算采用式(10):

$$V_{dy22} = (A \times \varphi_1 \times D) \times \varphi_2 \quad (10)$$

式中: A ——坡面泥石流区域面积;

D ——坡面泥石流区域评价深度;

φ_1 ——面积折减系数,一般取 $15\% \sim 20\%$;

φ_2 ——体积折减系数,一般取 $15\% \sim 20\%$ 。植被较多,取 20% ; 植被较少,取 15% 。

2 泥石流影响范围的模拟

基于三维遥感影像系统提取的 DEM 与泥石流所搬运的土石量是衡量影响范围的参数,基于 GIS 开发了一个泥石流影响范围分析模块。图 4 是一个理想化的泥石流汇水区模型,利用 GIS 的空间分析功能确定泥石流沟内的地形参数:横截面面积 A 与平面面积 B ,进而分析泥石流土石量 V 与地形参数 A 、 B 的关系。确定式(11)与(12)^[6],判断地形参数 A 与 B 的关系,实现计算机算法,给定泥石流爆发起点,可得到泥石流的影响范围。

$$A = 0.05V^{2/3} \quad (11)$$

$$B = 200V^{2/3} \quad (12)$$

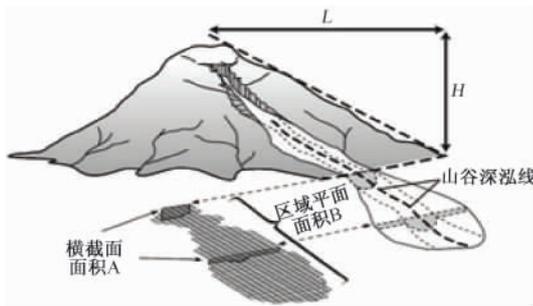


图 4 泥石流汇水区模型

Fig. 4 Model of the collection area of debris flow

3 实例分析

3.1 泥石流沟概况

泥石流所携带的泥沙石块进入主河道,会增加河水的含沙量,使主河道发生淤积,一旦主河道的流量大于预期值,便可能导致河道上水电站工程失事。四川省某库区发育一典型的泥石流沟,且支沟较发育。根据遥感影像提取泥石流沟的汇水区范围、河谷及不良地质体及地形参数,确定地形上 0 次谷和 1 次谷的分布,如图 5 所示。

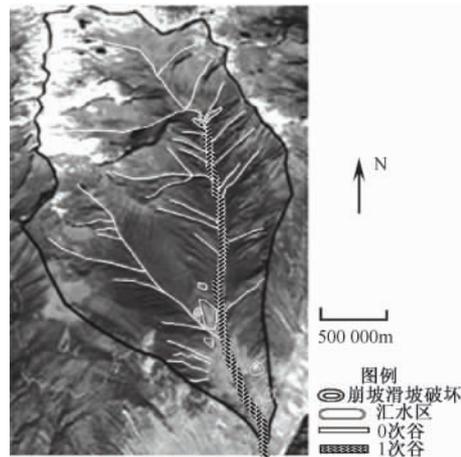


图 5 地形划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of terrain division

3.2 泥石流土石量计算

3.2.1 可能移动的土石量

依据经验及现场勘查报告,取 1 次谷平均堆积深度为 3m ,取 0 次谷平均堆积深度为 1.8m 。通过文中所述方法得到库区潜在危险泥石流区域可能移动的土石总量见表 1。

3.2.2 考虑降雨搬运的土石量

根据该泥石流沟地区的水文气象资料,考虑 24h 内可能的降雨量,得到不同降雨量下的泥石流可能搬运的土石总量,计算结果见表 2。

表 1 泥石流总量计算

Table 1 Existing earth-rock amount

项目	泥石流流量 (m^3)	折减系数	折减后泥石流流量(m^3)
0 次谷	4 103 871.56	0	4 103 871.56
1 次谷	1 473 077.29	0	1 473 077.29
崩塌滑坡	780 495.23	20%	156 099.05
合计			5 733 047.90

注:崩塌滑坡破坏考虑 $15\% \sim 20\%$ 的折减

泥石流汇水区内可能移动的土石量是该区域存在的土石量,降雨所能搬运的是考虑降雨形成水流所能携带的土石量的计算结果。一般来说,一次降雨所能搬运的土石量应该远小于区域内可能移动的土石量。本例计算表明,该泥石流汇水区内可能移动土石量为 $573 \times 10^4 \text{ m}^3$,考虑 24h 可能降雨量为 250mm 的搬运土石量为 $125 \times 10^4 \text{ m}^3$,其结果可为拦砂坝等水工建筑物的设计提供参考依据。

表 2 不同降雨量下泥石流土石量计算

Table 2 Possible output carried by different rainfall runoff

降雨量 (mm)	泥石流流量 (m^3)
0	0
10	50 178.94
25	125 447.34
50	250 894.69
100	501 789.38
200	1 003 578.76
250	1 254 473.45

3.3 泥石流影响范围模拟

以该泥石流沟区域最大降雨量 250mm 所搬运的土石总量为危险性预测依据,结合 DEM 确定泥石流爆发的起点,经分析得到影响范围见图 6。

由预测范围图可以直观地了解泥石流影响范围及堆积物分布情况,经分析,该泥石流固体物质不会对构筑物造成影响,但是其固体堆积物会对水库造成淤积。

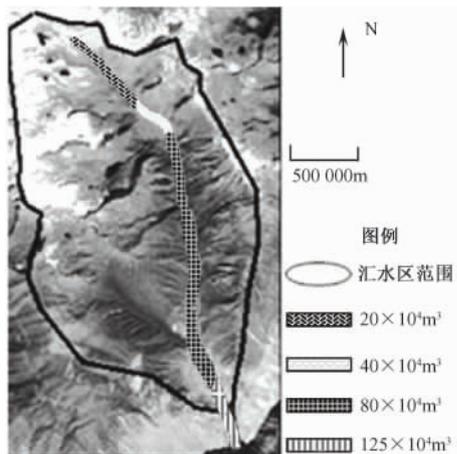


图 6 泥石流堆积模拟范围

Fig.6 Stimulation of the influence area of debris flow

4 结论

根据四川省某库区潜在泥石流发育区的三维遥感影像系统提取泥石流的汇水区、流通区及堆积区,采用地形解译手段引入 0 次谷与 1 次谷概念定量分析泥石流发育区内存在的土石量,并分析不同降雨量所能搬运的土石量,研究结果表明考虑降雨作用下搬运的土石量要比流域内可能移动的土石量小。

将三维遥感影像提取的 DEM 和考虑 24h 降雨量为 250mm 的移动土石量为 $125 \times 10^4 \text{ m}^3$ 作为影响范围预测的基础,采用 GIS 的水理解析功能确定地形参数,通过地形参数的判别关系,进行影响范围分析。影响范围表明:泥石流固体物质不会对构筑物造成影响,但是其固体堆积物会对水库造成淤积。本文研究方法可为类似地区泥石流评价提供参考。

参考文献:

[1] 池谷浩,米尺谷,诚悦. 土石流危险区の設定に関する研究(第二报)[J]. 土木技术资料,1970,21(9): 46-50.

[2] 高桥保. 土石流の堆积危险范围的预测[J]. 自然灾害科学总合ツソポツテム,1980,17:133-148.

[3] 水山高久,渡边正幸,上原信司. 土石流の堆积形状[J]. 自然灾害科学总合ツソポツテム,1980,17: 169-172.

[4] 刘传正,刘艳辉. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质,2007,34(6):109-125. [LIU C Z,LIU Y H. Early warning theory for regional geo hazards and design of explicit statistical sysem [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2007,34(6):109-125. (in Chinese)]

[5] 国土交通省国土技术政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室. 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説[S]. 国総研資料,2007.

[6] Richard M Iverson, Steven P Schilling, James W Vallance. Objective delineation of lahar - inundation hazard zones [R]. Geological Society of America Bulletin,1998.

A 3-D remote sensing system based on assessment of debris flow and impact area simulation

XIE Mo-wen , LIU Xiang-yu , WANG Zeng-fu , HU Man

(*School of Civil and Environment Engineering , Beijing University of Science and Technology , Beijing 100083 , China*)

Abstract: A new quantitative calculation method of the earth-rock output of debris flow is presented in this paper. In the area of geological disaster development , the earth-rock output assessment is involved in both the surface loose accumulation and the output of the possible geological hazards , such as collapse and landslide. In the collection area of debris flow , the terrain is divided into 0-time valley and 1-time valley. Two methods are used to analyze the results of the calculation in order to make it more precise. One method is based on the existing earth-rock amount , the other is on the possible output which can be carried by rainfall runoff. The simulation of influence area is based on DEM and the earth-rock output carried by rainfall runoff. The GIS function of spatial analysis is used to obtain terrain parameters such as area of the cross section of the collection region of debris flow and area of the regional plane. The relationship between the amount of earth-rock discharge and terrain parameters is distinguished to realize the stimulation of the influence area of debris flow. The result of the analysis can provide a reference for the assessment of potential dangerous region of debris flow.

Key words: earth-rock output; rainfall; remote sensing; GIS; terrain analysis

责任编辑:汪美华

(上接第 114 页)

Characteristics and cause analysis of the Pingxi landslide triggered by the Wenchuan earthquake

YUAN Jin-ke , HUANG Run-qiu , PEI Xiang-jun , ZHANG Yuan-cai , LIU Yun-peng

(*State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention & Geological Environment Protection , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , China*)

Abstract: The Pingxi landslide is a highspeed rock landslide located in Pingwu County of Mianyang City. It was triggered by the Wenchuan earthquake. It covers an area of $3.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ and its volume is $65 \times 10^4 \text{ m}^3$, the sliding direction is about 340° . This landslide is mainly composed of Cambrian crystalline limestone , with the development of the following two control structural plane: ① $N55^\circ - 65^\circ W / NE$ and ② $N75^\circ - 85^\circ E / SE$. The distance between the landslide and the Shikan fault in Yingxiu - Beichuan seismogenic fault is 500 m or less. Different from the smooth and somewhat arcwall slip surface caused by gravity force , the slip surface of landslide triggered by seismic force is steep and rough. The cause of earthquake-landslide can be divided into three stages: ① the stage of shattering cracking , ② the stage of friction decrease and "locked section" snipping , and ③ the stage of slope mass sliding-accumulating. Shock cracking occurs within the rockmass , causing the debacle surface to form and interconnect , and constituting the perimeter of slope mass to slide. After the sliding perimeter occurs , "locked section" in the landslide front is snipped sharply , and slope mass slides with high speed along the slip surface. Combining with mechanical analysis of structural plane and using numerical simulation to analyze the stress and earthquake-induced deformation under earthquake are of important significance to the study of earthquake-landslides.

Key words: earthquake-landslide; Pingxi landslide; Wenchuan Earthquake

责任编辑:汪美华