

降雨型浅层滑坡的变形预测模型

李德心¹, 何思明²

(1. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院 四川 成都 610017;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041)

摘 要: 滑坡是边坡被某些诱发因素激发失稳产生滑动的一种地质现象。它是地质灾害的主要类型, 尤其以降雨滑坡数量最多, 其中浅层滑坡分布最广。通过对降雨型浅层滑坡的变形进行分析, 建立了基于功能原理的滑坡一维运动方程, 并结合太沙基固结原理, 研究滑坡运动过程中孔隙水压力的消散, 揭示了滑坡从运动 - 停止的动力演化过程, 构建了降雨型浅层滑坡的位移预测模型, 并以都江堰塔子坪滑坡为例进行分析, 通过 mathematic 给出了滑坡运动的速率、位移与降雨量的量化关系式。

关键词: 降雨; 浅层滑坡; 变形预测; 模型分析

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

滑坡是地质灾害的主要类型, 降雨是导致滑坡发生的主要诱发因素, 浅层滑坡堆积物特定的物质组成、结构性状及厚度条件决定了区域性浅层滑坡对降雨的特殊敏感性, 其分布最广。

从目前国内外的研究现状看: 滑坡的变形预测主要通过现场调查、监测以及 GIS 技术对滑坡位移相关参数进行收集整理, 采用数理统计、回归方法进行预测。此方法具有局限性, 难以推广应用。

Jordi Corominas(2005)^[1] 根据降雨后地下水位的变化, 选用一些参数预测滑坡的位移; J. A. Fernández - Merodo (2008)^[2] 采用 GBSAR 连续测量 47 d, 提供了每小时滑坡区域位移图, 提出两种模型来预测由降雨引起的滑坡位移变化。许建聪(2005)^[3] 对典型浅层和中层松散土质滑坡位移、降雨量进行函数模型非线性回归分析, 得出浅层土质滑坡位移与降雨量一般服从幂函数分布的规律; 张友谊、刘俊新(2009)^[4] 运用 FLAC 软件分别对不同降雨条件下峡口滑坡变形体的变形情况进行定量分

析计算, 并揭示其在不同降雨条件下的变形特征和变形机制, 为滑坡的量化评价提供科学依据。

本文在总结国内外学者研究成果的基础上, 将一些方法引入到此研究中, 对降雨型浅层滑坡构建位移预测模型进行分析, 深化人们对滑坡变形机制的认识, 为滑坡的预报监测、预警提供技术支撑。

1 降雨滑坡水文模型

滑坡的发生通常受降雨过后上游集水盆地中充沛的水源浸润斜坡土体, 降低浅层斜坡土体的稳定性, 最终导致滑坡的发生。

如图 1, 滑坡土体的垂直厚度为 Z , 由达西定律知, 降雨作用下通过某断面的流量 Q 为

$$Q = Fv \quad (1)$$

式中 $v = ki$: 渗流速度; k : 渗透系数; $i = \sin\theta$: 水力坡度; θ : 边坡体倾角; F : 过水断面, 可表达为

$$F = hb\cos\theta \quad (2)$$

收稿日期(Received date): 2012 - 02 - 24; 改回日期(Accepted): 2012 - 03 - 10。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(40830742), 科技部科技支撑项目资助。(2011BAK12B03)。[Supported by National Natural Science Foundation Program (40830742) and Ministry of Science and Technology(2011BAK12B03) .]

作者简介(Biography): 李德心(1984 -), 女, (汉族), 助工, 主要从事特殊路基边坡工程设计、防治技术研究。[Li Dexin(1984 -), female, the Han nationality. Assistant Engineer, mainly engaged in special embankment slope engineering design, prevention and control technology.] E-mail: muzidexin2007@126.com

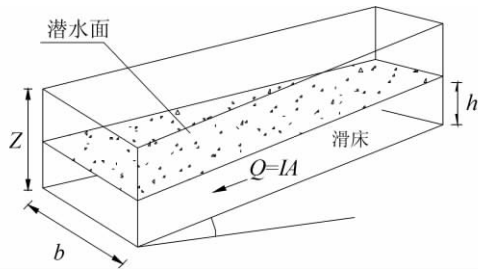


图1 滑坡土体水文模型

Fig.1 Hydrological model of landslide

式中 b : 斜坡宽度; h : 滑坡土体中地下水的水层厚度 结合上述两式有下式

$$Q = khbsin\theta\cos\theta \quad (3)$$

特别的 随降雨量的增加 滑坡土体中潜水位不断上升。当 $h = Z$ 时,堆积体充满水并达到完全饱和状态时 滑坡土体中径流流量达到极值

$$Q_z = kZbsin\theta\cos\theta \quad (4)$$

同时 根据水力学公式知饱和滑坡土体的径流等于导水系数 T 与水力梯度 $\sin\theta$ 及斜坡宽度 b 的乘积。表达为

$$Q_z = Tbsin\theta = kZbsin\theta\cos\theta \quad (5)$$

这里认为水力传导性在滑坡体的深度方向上均匀分布 即不随深度 Z 而产生显著的变化,则滑坡土体的导水系数 $T = kZ$ 其他符号意义同前。

综合式(3-5) 将(3)式除以(5)式可推导出特定降雨强度下 滑坡土体中潜水厚度

$$h = \frac{Q}{Tbsin\theta}Z \quad (Q = IA) \quad (6)$$

式中 A : 滑坡体流域面积; I : 等效降雨强度。

2 基于无限边坡理论的滑坡变形预测模型

如图2所示的简化的粘塑性滑体分析模型,选择单位宽度、长度的单元体,研究其力的平衡关系:滑坡体厚度为 Z ,降雨后地下水位高度为 $h(t)$,滑动面倾角为 α ,粘滞力剪切带厚度为 d ,本文假定地下水水面、滑动破裂面与地表平行,根据极限平衡原理,考虑静水压力及动水压力(渗透压力),可以表达如下式

$$F - F_r - F_v = ma \quad (7)$$

式中 F 为下滑力, F_r 为抗滑力, m 为滑体质量, a 为剪切带粘滞力, a 为滑坡体运动加速度。

则平行于斜坡方向上的动量平衡方程可以简

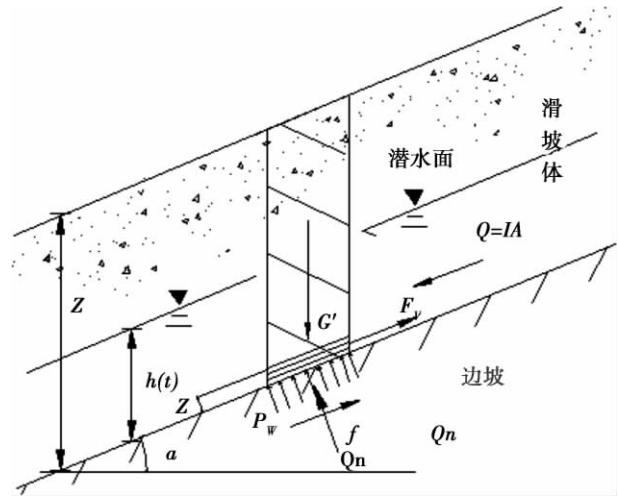


图2 滑坡土体位移预测计算模型

Fig.2 Displacement predictive model of landslide

化成

$$\tau - [c' + (\sigma - p_w(t)) \tan\varphi'] - \tau_v = ma \quad (8)$$

$$p_{w0}(t) = h(t) \gamma_w \cos^2\alpha \quad (9)$$

根据太沙基固结原理

$$p_w(t) = p_{w0}(t) e^{-\frac{t}{T_v}} \quad (10)$$

式中 τ 为重力沿滑面的剪切力, c' 为有效粘聚力 (t/m^2), σ 为法向应力 (kPa), φ' 为有效内摩擦角 ($^\circ$), τ_v 是粘滞强度 (kPa), p_{w0} 是初始孔隙水压力 (kPa), $p_w(t)$ 是随时间变化的孔隙水压力 (kPa), T_v 为时间因数 (s)。

根据摩尔库伦定律将公式(8)化简如下

$$\gamma Z \sin\alpha \cos\alpha - [c' + (\gamma Z \cos^2\alpha - p_w(t)) \tan\varphi'] - \tau_v = ma \quad (11)$$

根据宾汉流体模型 粘滞力表示为

$$\tau_v = \frac{\eta}{d} v(t) \quad (12)$$

式中 γ 为滑坡体天然重度 (N/m^3), γ_w 为水的重度 (N/m^3), η 为粘滞力系数 ($kPa \cdot s$), $v(t)$ 是随时间变化的速度 (m/s), $h(t)$ 是随时间变化的地下水位高度 (m)。

3 实例与分析

塔子坪上方滑坡(图3)位于四川省都江堰市虹口乡的东南部,白沙河右岸,所处地貌单元为中山构造侵蚀区,“5.12”汶川地震导致滑坡发生,形成的大量松散堆积物覆盖于山坡之上。地震后至今经过2个雨季,滑坡体发生变形,在其后缘壁坡脚与滑坡

松散堆积体接触地带产生变形下错,同时在滑坡西侧边界出现错动变形现象。



图3 滑坡体变形

Fig.3 Deformation of the landslide

地震后滑坡结构松散,加之降雨、山体的汇水,在下错及错动变形处,已形成冲沟。滑坡前缘边界明显,震后滑坡前缘出现鼓胀变形现象(图4)。



图4 滑坡变形加剧

Fig.4 Deformation of the landslide exacerbate

我们以都江堰塔子坪上方山体滑坡为例,开展降雨型区域浅层滑坡的变形预测研究。其中相关的模型计算参数见表1。

表1 降雨型滑坡变形预测模型某一类土计算

Table 1 A certain class of soil calculate parameters of landslide by rainfall

A/km^2	b/m	$\rho_s/(\text{kg}/\text{md}^3)$	$\alpha/^\circ$	$\eta/(\text{kPa} \cdot \text{s})$	$T/(\text{m}^2/\text{d})$
1.02	530	2300	30	8.6×10^9	285
D/m	$\varphi'/^\circ$	T_v/s	$c'/(\text{kPa})$	d/cm	$c_v/(\text{m}^2/\text{a})$
1.6	35	86 400	0	30	1.5

设 m 为单位宽、单位长、厚度为 Z 的土体质量,上式(8)可以表示如下

$$ma(t) + \frac{\eta}{d}v(t) = mg\sin\alpha\cos\alpha - [c' + mg\cos^2\alpha - p_w(t)\tan\varphi'] \quad (13)$$

用 mathematic 算出滑坡体运动速度和位移的通解

$$v = \frac{1}{2}de^{\frac{-t}{T_v}} \left[-\frac{2e^{\frac{-t}{T_v}}\sec\varphi [c\cos\varphi - mg\cos\alpha\sin(\alpha - \varphi)]}{\eta} + \frac{2eP_{w0}T_v\tan\varphi}{T_v\eta - md} \right] + C[1]e^{\frac{-t}{dm}} \quad (14)$$

$$s = -\frac{cdt}{\eta} - \frac{de^{\frac{-t}{dm}}mC[1]}{\eta} - \frac{de^{\frac{-t}{T_v}}eP_{w0}T_v^2\tan\varphi}{T_v\eta - md} + \frac{dgm\cos\alpha\sec\varphi\sin(\alpha - \varphi)}{\eta} \quad (15)$$

根据 2007-05-06 降雨量,如图 5 所示。

降雨入渗导致坡体孔隙水压力增加、有效应力降低,进而诱发滑坡启动并发生坡体滑动,在坡体运动过程中,滑动面土体发生固结,孔隙水压力不断消散,最后坡体运动停止。降雨后,坡体内有一降雨产生的水位高度,加上初始水位高,总的水位高产生初始孔隙水压力,消散到临界状态时不再运动。具体参数见表 2。

这里认为降雨量全部渗入土体,且不考虑降雨入渗的过程,雨水入渗导致坡体孔隙水压力增加、有效应力降低,进而诱发滑坡启动并发生坡体运动,根据公式(14)算出滑坡启动时的速度(取时间 $t = 60$ s),如图 6 所示。

滑坡启动时加速度最大,初速度为 0,在坡体运动过程中,随着滑动面土体发生固结,孔隙水压力不断消散,坡体运动加速度减小,孔隙水压力下降到临界状态时,坡体运动停止,根据(15)式算出滑坡启动到运动停止的位移,如图 7 所示。

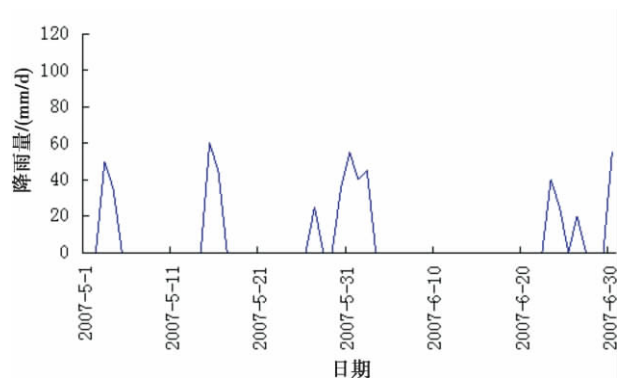


图5 日降雨量图

Fig.5 The distribution map of daily rainfall

表 2 滑坡速度、位移计算参数

Table 2 The velocity and displacement calculation parameters of landslide

日降雨量 /(mm/d)	降雨水位 高度/mm	初始水位 高度/mm	总的水位 高度/mm	初始孔隙 水压力 /Pa	孔压消散到 临界状态时 的时间/d
35	756	200	956	7 170	3. 85
40	864	200	1 064	7 980	4. 93
45	972	200	1 172	8 790	5. 89
50	1 080	200	1 280	9 600	6. 77
55	1 188	200	1 388	10 410	7. 58
60	1 296	200	1 496	11 220	8. 34

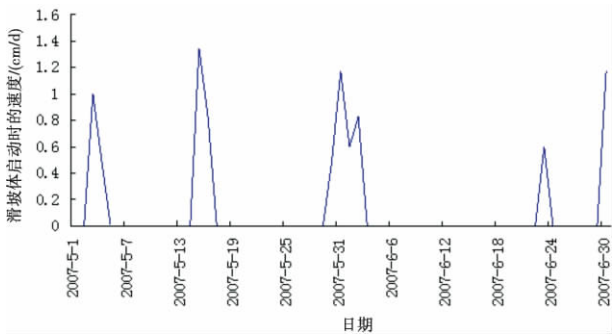


图 6 不同降雨条件下滑坡体启动时的速度

Fig. 6 The started speed of landslide in different rainfall conditions

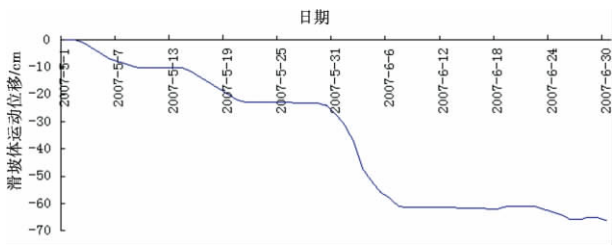


图 7 不同降雨条件下滑坡体运动位移

Fig. 7 The displacement of Landslide in different rainfall conditions

降雨在滑坡中的作用和滑坡演变过程极其复杂。本文分析不同于统计方法 统计方法简便、易操作 缺点是缺乏科学性和严密性; 本文是建立动力学模型进行分析 科学地表达了降雨在滑坡中的作用 , 严密地表征了降雨与滑坡位移的关系 ,采用这种预测模型可以较好反映滑坡的变形趋势。

4 结论

滑坡的运动是一个集滑动、转动、拉张等运动方式的复杂运动过程 本文根据浅层滑坡的特点 ,首先从降雨诱发边坡失稳的机理出发 ,建立滑坡一维运动方程 ,结合太沙基固结原理 ,研究滑坡运动过程中孔隙水压力的消散 ,揭示降雨滑坡从运动 – 停止的动力演化过程 构建了降雨滑坡位移预测模型。以都江堰塔子坪降雨滑坡为例进行分析 ,给出了降雨浅层滑坡体运动的速率、位移与降雨量的量化关系式 ,与实测位移进行比较 验证了本文预测模型的有效性及其可行性。其研究成果可以为降雨型浅层滑坡位移的预测预报提供技术支持。

参考文献(References)

[1] Jordi Corominas ,Jose Moya ,Alberto Ledesma ,et al. Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees ,Spain) [J]. Landslides 2005 , (2) : 83 – 96

[2] J A Fernández – Merodo ,G Herrera ,P Mira ,et al. Modelling the Portalet landslide mobility International Environmental Modelling and Software Society (iEMS) [CP]. 2008

[3] Xu Jiancong ,Shang Yuequan ,et al. Elastoplastic contact fem analysis of bedding landslide stability [J]. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005 ,24(13) : 2 231 – 2 236 [许建聪 ,尚岳全 ,陈侃福 ,等. 顺层滑坡弹塑性接触有限元稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报 ,2005 ,24(13) : 2 231 – 2 236]

[4] Zhang Youyi ,Liu Junxin ,Feng Tao. Numerical simulation of creep behavior of Xia kou landslide under different Rainfall conditions [J]. Journal of Railway Engineering Society 2009 ,124(1) : 23 – 25 [张友谊 ,刘俊新 ,冯涛. 峡口滑坡不同降雨条件下蠕变行为分析 [J]. 铁道工程学报 ,2009 ,124(1) : 23 – 25]

[5] Lan Hengxing ,Zhou Chenghu ,et al. GIS based landslide stability and hydrological distribution coupled model [J] Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2003 ,22(8) ,1309 – 1314 [兰恒星 ,周成虎 ,王苓涓 ,等. 地理信息系统支持下的滑坡 – 水文模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2003 ,22(8) ,1309 – 1314]

[6] Fausto Guzzetti ,Mauro Cardinali ,Paola Reichenbach ,et al. Landslides triggered by the 23 november 2000 rainfall event in the Imperia Province ,western Liguria ,Italy [J]. Engineering Geology 2004 , 73: 229 – 245

The Deformation Prediction Model on Rainfall-triggered Shallow Landslide

LI Dexin¹, HE Siming²

(1. Sichuan Communication Surveying and Design Institute, Chengdu 610017, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Landslide is a geological phenomenon, which stimulated by certain predisposing factors, losing stability and sliding. It is the main type of geological disasters. Especially the largest number of rainfall-landslide, shallow landslide is the most widely distributed. we analysis the deformation of Rainfall-triggered Shallow Landslide in this article. we establish one-dimensional equation of motion of the landslide based on the functional principle, combining with the Terzaghi consolidation principle, and study the dissipation of pore water pressure in the course of the campaign, revealing the dynamic evolution process from the movement to stop. Finally, we build a rainfall-triggered shallow landslide deformation prediction model. Taking the displacement of Dujiangyan taziping landslide for example, We deduce the rate of landslide movement, displacement and rainfall quantitative relationship by the use of mathematic.

Key words: Rainfall; shallow landslides; deformation prediction; model analysis

封面照片说明: 贡嘎山海螺沟冰川

贡嘎山是青藏高原东部大雪山脉的主峰,也是青藏高原东部的最高峰,海拔 7 756 m,位于四川省康定县和泸定县之间。由于其海拔高,降水充沛,海洋性冰川发育。以贡嘎山为中心,发育有 74 条现代冰川,冰川面积达 255.1 km²,其中海螺沟冰川最为著名。

海螺沟发育于贡嘎山东坡,沟口高程不足 1 400 m,距主峰水平距离约 25 km,垂直落差超过 6 300 m。巨大的地形高差使海螺沟流域内垂直地带性显著,从亚热带至寒带的自然带谱完整,具有冰川奇特、森林茂密、环境优美的独特景观。其上游发育的海螺沟冰川为贡嘎山最长的一条现代冰川,长度超过 13 km,冰川末端高度仅 2 980 m,各种冰川和冰缘地貌,如冰下河、冰川城门洞、冰裂隙、冰阶梯、石蘑菇、冰川漂砾、冰川瀑布、冰川侧碛和终碛、冰川擦痕、“U”形谷及现代冰川退缩遗迹等十分发育。

照片为海螺沟冰川近末端段。

(嘉 益)