

重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型*

陈洪凯¹, 董平¹, 高阳华², 唐红梅¹, 唐云辉², 谭玲¹, 魏来¹, 唐兰¹

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

摘要:重庆地区属于我国降雨型滑坡高易发区,目前气象部门采用的滑坡灾害气象预报模型属于统计模型,适用于滑坡灾害区域性预警预报,不能实现对单体滑坡发生概率的气象预报。引入考虑强降雨作用下土质滑坡表层的最大入渗深度,并考虑滑坡体后缘拉张裂缝水压力,修正了工程上常用于确定滑坡稳定系数及滑坡推力的传递系数法;结合采用有效累计降雨量和当日最大小时降雨量两个指标建立的降雨型滑坡统计预报模型,构建了重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型,该模型利用滑坡发生指数将滑坡预报等级分为5级,分别表示滑坡发生的可能性为极小、小、较大、大和极大,通过室内模型试验验证了该模型的合理性。实用中,可将该模型嵌入重庆市地质灾害气象预报系统中,实现对重庆境内典型单体滑坡在强降雨条件下发生可能性的气象预报。

关键词:滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型;滑坡发生指数;气象预报;降雨型滑坡;重庆地区

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2015)01-0046-06

滑坡是我国主要地质灾害类型,尤其是浅层土质滑坡,对降雨的响应过程更为敏感,这也是气象部门通过精细天气要素进行滑坡灾害预警预报的主要理论依据^[1]。迄今,国内外学者高度重视降雨诱发滑坡的机理研究,如 Khan Y. A. 等对发生在孟加拉国吉大港的降雨滑坡进行统计,研究了该地区降雨强度和降雨历时与滑坡的响应关系,利用耿贝尔极值分布得到了降雨诱发滑坡的临界雨量值^[2]; Lepore C. 等对波多黎各岛降雨诱发滑坡的机理进行敏感度分析,认为坡度、海拔、地质断层等地质条件对滑坡的发育有重要影响,降雨对滑坡的破坏起到激发作用^[3]; Montrasio L. 等以艾米利亚-罗马涅亚平宁山脉周边的滑坡为研究对象,从地质和气候的角度分析了降雨诱发型滑坡的安全系数与降雨强度的响应关系^[4]; Gattinoni P. 等通过野外考察分析了意大利南部的马耶拉托滑坡失稳前后的降雨特征,并结合数值模拟分析了降雨条件下滑坡的失稳机理^[5]; Capparelli G. 等以边坡位移与前期降雨的关系为基础建立了滑坡预报(FLAIR)模型,利用该模型确定位移函数并得到诱发滑坡的降雨量临界值^[6]; Enrico C 和 Antonello T 分析了降雨诱发浅层滑坡的力学机理^[7]。国内学者从非饱和土力学角度,采用数值模拟方法,探讨了降雨对滑坡的激发作用,如刘礼领等应用有限元法模拟了暴雨中有无裂隙情况下斜坡体内的瞬态渗流场,并采用 Bishop 法进行了不同埋深滑动面条件下的滑坡稳定性分析,发现滑坡体表面存在裂缝时对滑坡的稳定性有较大影响^[8]。

重庆地区是我国滑坡灾害高易发区,极端气象条件出现频率高,从气象要素角度探索构建适用于重庆境内滑坡灾害预警预报模型一直得到学术界和政府部门的高度关注,如李晓基于对1986年7月4日、1987年7月20日和1989年7月10日3次强降雨的统计分析发现,重庆境内地质灾害的发生频率与降雨强度的相关系数达0.9^[9];陈剑等通过对重庆境内112个降雨诱发滑坡事件的统计分析发现,滑坡发生前最大24h降雨强度可作为滑坡的有效预报因子^[10];张珍等指出,重庆境内滑坡活动强度与雨量大小成正比,滑坡多数发生在降雨之后的4d内^[11]。

然而,气象部门目前采用滑坡预报模型均为统计模型,主要适用于滑坡灾害的区域性气象预报,不能科学预报强降雨作用下单体滑坡的致灾可能性,况且这项工作是气象部门当前地质灾害预警预报亟待解决的重要内容。鉴于此,本文基于对发生在重庆境内具有代表性的285次降雨诱发滑坡事件进行统计分析,提出适用于重庆地区滑坡区域性气象预报的滑坡统计预报模型,并通过考虑降雨入渗作用,构建适用于从气象角度预报单体滑坡致灾可能性的降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型。研究成果可为重庆境内滑坡灾害尤其是单体滑坡

* 收稿日期:2013-09-08 修回日期:2014-02-17 网络出版时间:2015-1-7 16:04

资助项目:国家科技攻关项目(No. GYHY201006039);2013年重庆高校创新团队建设计划资助项目(No. KJTD201305);重庆市“两江学者”计划专项

作者简介:陈洪凯,男,教授,博士后,博士生导师,研究方向为地貌过程及其减灾力学,E-mail:chk99@163.com

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20150107.1604.009.html

的气象预警预报提供重要科学依据,并对其他地区滑坡灾害的气象预警预报提供参考借鉴。

1 重庆地区降雨型滑坡统计预报模型

由重庆市气象台近 4 年来的地质灾害预报应用以及重庆市气象研究所获得的滑坡统计资料表明,采用以累积降雨量表征的滑坡发生概率模型进行滑坡预报存在较大偏差,例如当日有效累积降雨量小于 50 mm 时,滑坡发生累积概率小于 20%,而日最大小时降雨量超过 20 mm 时,诱发浅层滑坡的概率可及 70%。因此,针对降雨型滑坡,有必要对有效累积降雨量模型进行修正。

本文主要选取重庆市地质环境监测总站提供的 2003—2006 年发生的近千个滑坡资料,筛选出具有确切发生时间、发生地点的滑坡共 285 个,并结合重庆市气象局提供的从 2003—2006 年期间距离相关滑坡最近的小时降雨气象资料,通过统计分析得到了有效累积降雨量和当日最大小时降雨量与滑坡发生概率之间的近似关系如图 1、图 2。进一步对统计资料进行多元线性回归分析,发现有效累积降雨量与当日最大小时降雨对滑坡是否发生以及滑坡发生数量之间的系数比分别为 0.73 : 0.27, 0.90 : 0.10,从而提出基于修正有效累积降雨量的滑坡发生概率预报模型^[12]

$$P=0.8P(R') + 0.2P(R_h), \tag{1}$$

式中, P 为降雨型滑坡发生概率,介于 0~1 之间; $P(R')$ 为采用有效累积降雨量预测的滑坡发生概率, $P(R_h)$ 为采用当日最大小时降雨量预测的滑坡发生概率,如图 1、图 2 所示,其逼近拟合公式分别为(2)式和(3)式:

$$P(R') = -6 \times 10^{-5} \times R'^3 + 0.016 \times R'^2 - 0.031R' + 1.035, \tag{2}$$

$$P(R_h) = -2 \times 10^{-6} R_h^5 + 4 \times 10^{-4} R_h^4 - 0.025R_h^3 + 0.56R_h^2 - 0.71R_h + 3.52, \tag{3}$$

式中, R' 为有效累积降雨量(mm); R_h 为当日最大小时降雨量(mm)。

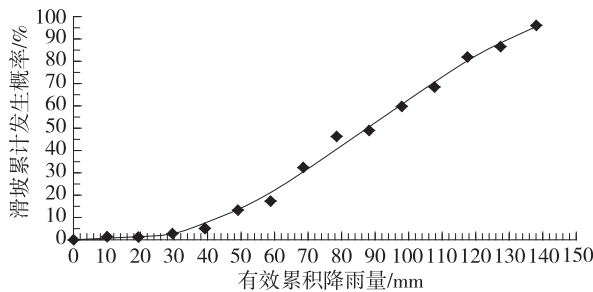


图 1 有效累积降雨量-滑坡发生概率曲线

Fig. 1 The curve of effective accumulated rainfall vs. the probability of occurrence for landslide

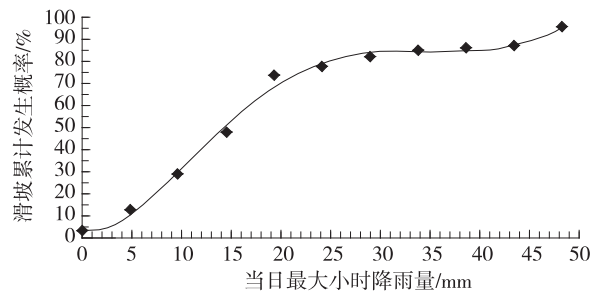


图 2 当日最大小时降雨量-滑坡发生概率曲线

Fig. 2 The curve of maximum hourly rainfall vs. the probability of occurrence for landslide

2 考虑降雨入渗的滑坡稳定系数计算方法

2.1 考虑降雨入渗的滑坡稳定性分析模型

构建考虑降雨入渗的滑坡稳定性分析模型如图 3 所示,基本假定为:第一,将滑坡体降雨入渗区视为饱和状态,其范围由最大降雨入渗深度控制。当 $h_{入渗} < H$ 时,滑动面抗剪强度参数取天然状态参数,降雨入渗对滑坡稳定性的影响主要体现在入渗区土体增重方面;当 $h_{入渗} \geq H$ 时,滑坡体处于饱和状态,滑动面抗剪强度参数取饱和状态参数,式中, $h_{入渗}$ 为最大降雨入渗深度(m), H 为滑坡体平均厚度(m)。第二,滑坡体后缘存在拉张裂缝时,将裂缝前缘及裂缝端部与滑动面之间的滑坡体定义为裂缝渗水影响区,区内的滑坡体及滑动面土体的物理力学参数取饱和状态参数。

2.2 降雨入渗公式

本文基于对重庆境内典型强风化泥岩的降雨入渗实验研究^[13],运用 Matlab 软件对相关实验数据进行分析,最终拟合出了只考虑降雨强度和降雨历时两因素作用下最大降雨入渗深度的经验公式

$$h_{入渗} = 139.82I - 1.79t + 0.032t^2 - 569.95I^2, \tag{4}$$

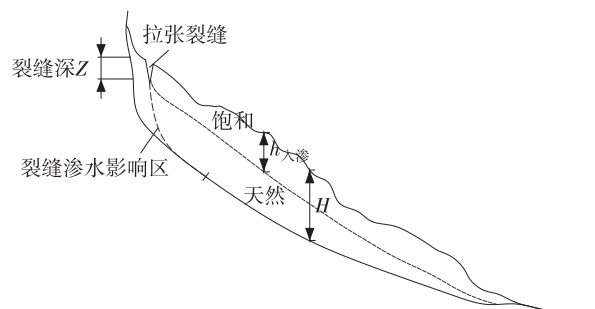


图 3 考虑降雨入渗的滑坡稳定性分析模型

Fig. 3 Analysis model of landslide stability considering rainfall infiltration

式中, I 为降雨强度 (mm/min); t 为降雨时间 (min); $h_{\text{入渗}}$ 为最大入渗深度 (mm); 该拟合公式适用范围为: $I \in [0.17, 1]$, $t \in (0, 240)$ 。

2.3 拉张裂缝深度

将滑坡后缘的拉张裂缝深度近似为土体内拉应力区深度, 根据朗肯粘性土体的主动土压力理论^[14]可以得到

$$Z = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}, \quad (5)$$

式中, Z 为拉张裂缝深度 (m); c 为天然状态下土体粘结力 (kPa); γ 为土体天然重度 (kN/m³); $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 为朗肯主动土压力系数, φ 为天然状态下土体内摩擦角 (°)。

2.4 裂隙水压力

强降雨及其引发的地表径流进入滑坡体后缘拉张裂缝内, 考虑裂缝内处于完全饱水状态时, 产生静水压力可由下式计算^[15]

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2, \quad (6)$$

式中, P_w 为空隙水压力 (kN/m); γ_w 为拉张裂缝内水体重度, 取 10 kN/m³; Z 为拉张裂缝深度 (m)。

2.5 考虑降雨入渗的滑坡稳定系数计算方法

目前, 工程上常采用传递系数法计算滑坡稳定系数, 本文引入降雨入渗作用修正传递系数法。将图 3 所示滑坡分析模型进行条块划分 (图 4), 其中第 i 条块受力模式如图 5 所示。滑坡的稳定系数计算式^[16]为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n}, \quad (7)$$

式中, R_i 为作用于第 i 条块的抗滑力 (kN/m); R_n 为作用于第 n 条块的抗滑力 (kN/m); T_i 为作用于第 i 条块沿滑动面上的分力 (kN/m); T_n 为作用于第 n 条块沿滑动面上的分力 (kN/m); ψ_j 为第 i 条块的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 条块时的传递系数 ($j=i$); W_i 为考虑降雨入渗后第 i 条块自重 (kN/m); n 为条块数。相关变量的计算^[16]如下

$$\psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_i, \quad (8)$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \cdot \psi_{i+1} \cdot \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1}, \quad (9)$$

$$R_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c l_i, \quad (10)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i, \quad (11)$$

$$W_i = W_{1i} + W_{2i} = [\gamma_{\text{sat}} h_{\text{入渗}} + \gamma (H_i - h_{\text{入渗}})] l_i \cos \alpha_i, \quad (12)$$

式中, φ_i 为第 i 条块滑动面摩擦角 (°); c_i 为第 i 条块滑动面粘结力 (kPa); α_i 为第 i 条块滑动面倾角 (°); l_i 为第 i 条块滑动面长度 (m)。

进一步考虑滑坡后缘拉张裂缝积水产生的静水压力后, (7) 式变化为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n + P_w}. \quad (13)$$

3 重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型

关于滑坡发生概率预测存在两种模型: 统计概率模型和与滑动机理相关的降雨入渗模型, 本文基于对滑坡的客观性认识, 引入多因子变量, 将上述两种模型进行统一, 提出了适用于重庆地区的单体降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型。

根据产生滑坡的可能性大小与 (1) 式所确定的强降雨作用下滑坡发生概率 P 成正比, 同时与 (13) 式所确定的考虑降雨入渗作用下滑坡稳定系数 F_s 成反比, 通过简单的数学比值关系建立了如下耦合预报模型

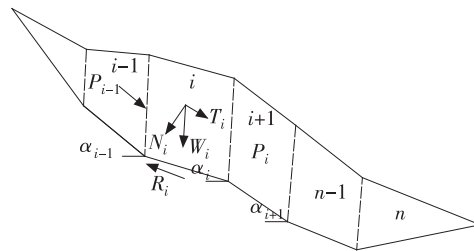


图 4 滑坡条块划分

Fig. 4 Slice division of landslide

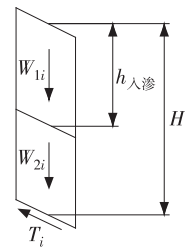


图 5 第 i 土条受力图示

Fig. 5 Forces mode of the i th slice

$$\eta = \frac{P}{F_s}, \tag{14}$$

式中, η 为滑坡统计-降雨入渗耦合发生指数。

本文进一步依据中国气象局和中国国土资源部联合发布的山体滑坡预报等级,该预报等级将滑坡发生可能性分为 5 级,并参考《重庆市地质灾害防治工程勘察规范》中滑坡稳定性分级标准,运用公式(14)计算出相应等级下的滑坡统计-降雨入渗耦合发生指数 η 的数值区间,其中 η 的下限值为对应等级中 P 的下限值与 F_s 上限值的比值, η 的上限值为对应等级中 P 的上限值与 F_s 下限值的比值,综合上述条件得出了单体降雨型滑坡预报等级(表 1)。

利用气象部门提供的精细气象数据(如 1 h 降雨强度、1 d 降雨量)提前对区域性滑坡灾害的发生概率进行地质灾害预报,此类地质灾害预报适用于区域性预警预报,不能对单体滑坡的发生概率进行预警预报。但本文建立的降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型则能较好地实现从气象角度进行单体滑坡发生可能性进行预警预报。实用过程中,将该模型嵌入重庆市地质灾害气象预报系统中,可以较好实现对重庆境内典型单体滑坡在强降雨条件下发生概率的预报。

表 1 单体降雨型滑坡预报等级

Tab. 1 Forecast grades for rainfall-induced landslide

预报等级	$\eta/\%$	$P/\%$	F_s	滑坡发生概率
1 级	[0, 8.7)	[0, 10)	≥ 1.15	极小
2 级	[8.7, 22.7)	[10, 25)	[1.10, 1.15)	小
3 级	[22.7, 47.6)	[25, 50)	[1.05, 1.10)	较大
4 级	[47.6, 75)	[50, 75)	[1.0, 1.05)	大
5 级	[75, + ∞)	[75, 95)	< 1	极大

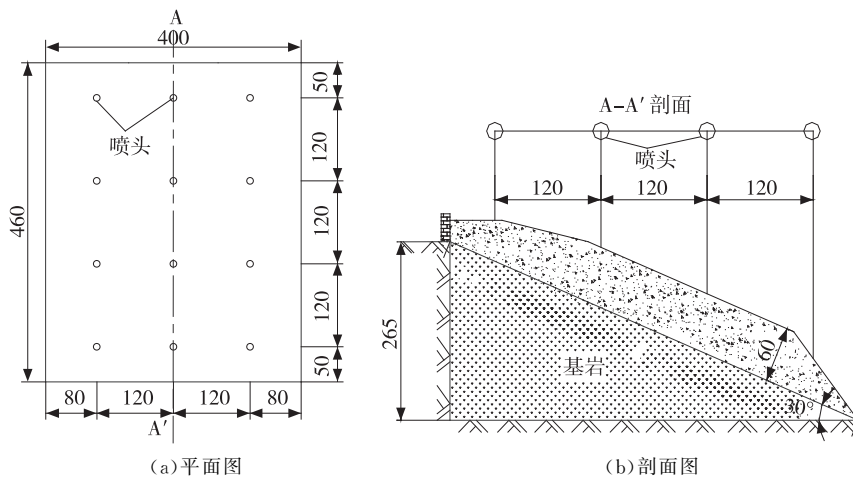
4 模型试验验证

本文采用降雨诱发滑坡室内模型试验验证所构建的降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型。试验模型如图 6 所示,模型尺寸单位为 cm。在 30° 的岩质斜坡表面均匀填筑粉质粘土,土体的主要物理力学参数见表 2。降雨装置为重庆交通大学岩土工程研究所具有自主知识产权的数控智能降雨装置(专利号 ZL201110113318.7),其降雨强度可控范围 5~25 mm/10 min。实验选取降雨强度为 7.5 mm/10 min,即 45 mm/h,并全程观察坡体表面裂缝变化情况。

表 2 模型试验土体物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of experimental soil

	天然状态 饱和状态	
	含水率/%	12
容重/(kN·m ⁻³)	21.2	21.9
粘聚力/kPa	16.1	5.4
内摩擦角/°	15.94	12.68
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	/	4.5×10 ⁻⁶



注:图中所有数据单位为 cm

图 6 降雨诱发滑坡试验模型

Fig. 6 Experimental model for rainfall-induced landslide

该模型试验一共实施两次降雨,即前期间隔降雨(2012 年 11 月 12 日),降雨量为 60 mm,分两次进行,每次降雨量 30 mm,间隔 120 min;连续强降雨一次(2012 年 11 月 13 日),降雨量为 90 mm,降雨历时 2 h。整

个过程降雨时间为 200 min,降雨强度为 0.75 mm/min,由(4)式确定最大降雨入渗深度

$$h_{入渗} = 139.82I - 1.79t + 0.032t^2 - 569.95I^2 = 139.82 \times 0.75 - 1.79 \times 200 + 0.032 \times 200^2 - 569.95 \times 0.75^2 = 70.4 \text{ cm}$$

由(5)式确定在滑坡后缘产生的拉张裂缝深度

$$Z = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} = \frac{2c}{\gamma \times \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{2 \times 16.1}{21.2 \times \tan\left(45^\circ - \frac{15.94}{2}\right)} = 201 \text{ cm}。$$

由于滑坡体总厚度为 60 cm,远大于可能出现的拉张裂缝深度,考虑最不利情况,取拉张裂缝深度 60 cm,则

裂缝积水产生的静水压力为

$$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 = 0.5 \times 10 \times 0.6^2 = 1.8 \text{ kN}.$$

相关变量计算如下:

$$W = W_1 + W_2 = [\gamma_{sat} h_{\lambda} + \gamma(H - h_{\lambda})] l \cos 30^\circ = 21.9 \times 0.6 \times 4 \times \cos 30^\circ = 45.52 \text{ kN},$$

$$R = (W \cos \alpha - P_w \sin \alpha) \tan \varphi + cL = (45.52 \times \cos 30^\circ - 1.8 \times \sin 30^\circ) \tan 12.68^\circ + 5.4 \times 4 = 30.27 \text{ kN},$$

$$T = W \sin \alpha + P_w \cos \alpha = 45.52 \times \sin 30^\circ + 1.8 \times \cos 30^\circ = 24.32 \text{ kN}.$$

由于滑动面为平面,所以对整个滑坡而言,条块之间的传递系数为 1,则

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \times 1) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \times 1) + T_n} = \frac{\sum R}{\sum T} = \frac{24.32}{30.27} = 0.8.$$

由该模型试验的降雨过程可知,降雨参数 $R' = 150 \text{ mm}$, $R_h = 45 \text{ mm/h}$,将其代入(2)式和(3)式,分别计算得到 $P(R')$ 和 $P(R_h)$,并代入(1)得:

$P = 0.8 \times P(R') + 0.2 \times P(R_h) = 0.8 \times 0.86 + 0.2 \times 0.81 = 0.85$ 最后,基于(14)式,得到该模型试验滑坡的失稳概率

$$\eta = \frac{p}{F_s} = \frac{0.85}{0.80} = 1.0625.$$

计算结果表明,模型试验滑坡的失稳指数为 106.25%,滑坡预报等级 5 级,即发生滑坡的可能性极大。

模型试验结果如图 7 所示,按上述降雨方案实施后,滑坡边界清晰可见,滑坡后缘出现 5~8 条拉张裂缝,整个滑坡体呈现出蠕滑状态,并且滑体中部已有约 1/6 的土体产生了明显的滑动,上述迹象是土质滑坡在降雨作用下表现出的典型变形与破坏特征,综合表明在该试验中,滑坡模型已经产生了滑动破坏,与耦合预报模型所得出的预测结果吻合。

5 结论

1) 引入考虑强降雨作用下土质滑坡表层的最大入渗深度,并考虑滑坡体后缘拉张裂缝水压力,修正了工程上常用于确定滑坡稳定系数及滑坡推力的传递系数法。

2) 重庆地区是我国滑坡灾害高易发区,强降雨极端天气出现频率高。本文从区域降雨型滑坡统计预报模型和降雨入渗条件下滑坡的稳定系数两方面,构建了重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型,提出了降雨型滑坡预报等级。该模型适用于重庆地区预报强降雨条件下土质单体滑坡的发生概率。

3) 通过室内模型试验,验证了所构建的重庆地区降雨型滑坡统计-降雨入渗耦合预报模型,将该模型嵌入重庆市地质灾害气象预报系统中,可以实现对重庆境内典型单体滑坡在强降雨条件下发生的可能性进行气象预报。

参考文献:

- [1] 马力,曾祥平,向波. 重庆市山体滑坡发生的降水条件分析[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 246-249.
- [2] Khan Y A, Lateh M H, Baton A, et al. Critical antecedent rainfall conditions for shallow landslide in Chittagong City of Bangladesh [J]. Environmental Earth Sciences, 2012 (67): 97-106.
- [3] Lepore C, Sameer A K, Peter S, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico [J]. Environmental Earth Sciences, 2012(66): 1667-1681.
- [4] Montrasio L, Valentino R, Lois G L. Shallow landslides triggered by rainfalls: modeling of some case histories in the Reggiano Apennine (Emilia Romagna Region, Northern Italy) [J]. Natural Hazards, 2012(60): 1231-1254.
- [5] Gattinoni P, Scesi L, Arieni L, et al. The February 2010 large landslide at Maierato, Vibo Valentia, Southern Italy [J]. Landslides, 2012(9): 255-261.
- [6] Capparelli G, Pasquale I, Giulio G R, et al. Modeling the rainfall-induced mobilization of a large slope movement in northern Calabria [J]. Natural Hazards, 2012(61): 247-256.
- [7] Enrico C, Antonello T. Simplified approach for the analysis of rainfall-induced shallow landslides [J]. Journal of Geotechni-

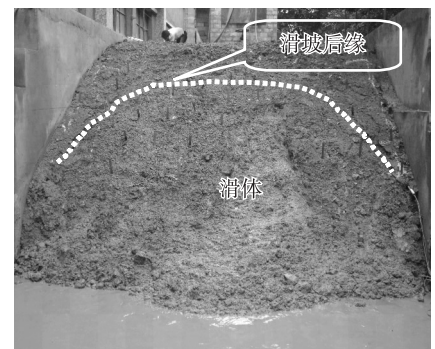


图 7 降雨诱发滑坡模型试验图示
Fig. 7 Experimental landscape for rainfall-induced landslide

- cal and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 398-406.
- [8] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1061-1066.
Liu L L, Ying K L. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1061-1066.
- [9] 李晓. 重庆地区的强降雨过程与地质灾害的相关分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(3): 39-42.
Li X. Relative analysis between strong rainfall process and geological hazards Chongqing city[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(3): 39-42.
- [10] 陈剑, 杨志法, 李晓. 三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3052-3056.
Chen J, Yang Z F, Li X. Relationship between landslide probability and rainfall in Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3052-3056.
- [11] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3185-3191.
Zhang Z, Li S H, Ma L. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3185-3191.
- [12] 魏来. 降雨诱发滑坡预测模型研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Wei L. Study on the prediction model of landslide induced by rainfall [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [13] 谭玲. 降雨诱发松散土质滑坡机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Tan L. The mechanism study of rainfall induced loose soil landslide [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [14] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011.
Lu T H. Soil Mechanics [M]. Nanjing: Hehai University Press, 2011.
- [15] DB50143-2003, 地质灾害防治工程勘察规范[S]. 重庆: 重庆市建设委员会, 重庆市国土资源和房屋管理局, 2003.
DB50143-2003, Investigation standard for geological hazard prevention engineering[S]. Chongqing: Chongqing Municipal Commission of Urban-Rural Development, Bureau of Land Resources and Housing Management of Chongqing Municipality, 2003.
- [16] DB50/5029-2004, 地质灾害防治工程设计规范[S]. 重庆: 重庆市建设委员会, 重庆市国土资源和房屋管理局, 2004.
DB50/5029-2004, Design standard for geological hazard prevention engineering[S]. Chongqing: Chongqing Municipal Commission of Urban-Rural Development, Bureau of Land Resources and Housing Management of Chongqing Municipality, 2004.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on the Statistics-infiltration Coupling Forecast Model for Rainfall-induced Landslide in Chongqing

CHEN Hongkai¹, DONG Ping¹, GAO Yanghua², TANG Hongmei¹,
TANG Yunhui¹, TAN Ling¹, WEI Lai¹, TANG Lan¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. Chongqing Institute of Meteorological Science, Chongqing 401147, China)

Abstract: Chongqing is located in the area prone to rainfall-induced landslide in China. Currently, the meteorological department adopts the landslide hazard-weather forecasting model part of statistical models which is only suitable for regional warning and forecasting, while, it can not apply to the monomer landslide. This paper, considering the maximum infiltration depth in the role of heavy rainfall and taking into account the water pressure in tension cracks located in trailing edge of landslide, revises the transfer coefficient method traditionally used to determine landslide stability factor and thrust force. What's more, based on integrating the effective cumulated rainfall and the daily maximum hourly rainfall, this article establishes the statistics-infiltration coupling forecast model for rainfall-induced landslide in Chongqing territory. By referring to the index of landslide occurrence, this model grades its forecasting levels into five: minimal, little, bigger, large and maximal, and justifies the reliability with laboratory model experiment. In practice, it can be incorporated into geological hazard weather forecasting system in Chongqing, and effectively make weather forecast for the typical monomer landslide potentially occurring under the condition of heavy rainfall in territory of Chongqing.

Key words: statistics-infiltration coupling forecast model; index of landslide occurrence; rainfall-induced landslide; weather forecasting; Chongqing