

基于条分法的边坡演化动力学预测模型

李聪^{1,2b},姜清辉^{2a,2b},朱杰兵¹,曾平¹

(1.长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010;

2.武汉大学 a.水资源与水电工程科学国家重点实验室; b.土木建筑工程学院,武汉 430072)

摘要:在传统条分法的基础上,考虑降雨引起地下水位变化,采用太沙基一维固结理论描述超孔隙水压力消散,基于条块连续变形假定,提出了一种新的边坡演化动力学预测模型。该模型认为滑体内部的速度和变形具有不均匀性,条块变形引起条间力变化,结合牛顿运动定律进行滑坡动力学分析,可以模拟滑坡运动的全过程,并预测滑坡的最大滑速和滑程。采用该模型模拟了千将坪滑坡启动以后的运动过程,结果与实际基本相符。表明该模型具有较大的工程应用价值。

关键词:边坡;预测;滑速;动力学;条分法

中图分类号:P 642.2

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)05-0064-06

1 研究背景

滑坡灾害分布广、发生频率高、危害大,是世界十大自然灾害之一。尤其是水库库岸滑坡,它的失稳会导致岩土体高速入水,不仅会冲毁水工建筑物,还会激起巨大的涌浪,危害大坝甚至影响下游,因此正确的计算滑坡速度、掌握速度在运动过程中的变化规律,并估算滑坡的破坏影响范围是必要的。

G. Herrera 等^[1]考虑粘滞特性,基于摩尔-库仑准则引入降雨强度,并通过一个简单的固结公式,考虑超孔隙水压力的消散,采用回归分析方法建立一维无限模型,可以对边坡的演化过程进行预测。D. Sornette^[2]等采用单变量摩擦定律建立了边坡滑块模型,提出了一个简单的物理模型来预测滑坡发生前的加速位移。邹爱清^[3]等采用非连续变形分析数值模型反映滑坡启动的识别方法,并对该滑坡体的启动条件和滑坡全过程特征进行数值模拟。伍法权^[4]等在传统的条分法的基础上采用离散元思想,提出了一种滑坡位移非线性动力学模拟方法。Oldrich Hungr^[5]基于拉格朗日法提出一种连续体模型分析计算高速滑坡的滑距来进行风险评估和防灾设计。Tiande Miao 等^[6]假定滑体的运动形式是连续可变的,建立了预测高速滑坡远程的块体运动模型,可以模拟滑坡发生后滑体运动的全过程,同时可

预测滑坡的最大滑速和最大滑距。殷坤龙^[7]等在考虑滑坡入水条块受水阻力的基础上,对计算滑速的美国土木工程师协会推荐公式和运动方程方法进行改进,计算了滑坡下滑过程中的平均速度及各条块的加速度和速度。

综上所述,已有的滑坡动力学预测方法主要分为3类。第1类^[1-2]是将滑体视为一整体,考虑滑体质心运动和能量损失,但该方法未考虑滑面倾角、滑体内部变形、速度和应力的不均匀性。第2类^[3-4]是非连续变形方法 DDA 和离散元,但该类方法考虑的并非连续可变的块体运动形式,且使用成本较高。第3类^[4-7]是条块预测模型,但已有的条块模型都存在不足,文献[4]中的模型采用静力学原理(极限平衡方法)计算动力学过程的条间力,文献[5-6]中的模型未考虑水的作用,文献[7-11]中的模型假设各条块的水平加速度 a_x 是相同的。

本文考虑降雨引起地下水位变化,采用太沙基一维固结理论描述超孔隙水压力变化,基于垂直条分法和条块连续变形假定,提出了一种新的边坡演化动力学预测模型。

2 基于条分法的滑坡动力学预测模型

整个滑坡可以看作以滑移面分界的2个子系统组成,即滑移面上的滑动体和滑移面下的不动体。

收稿日期:2012-03-04;修回日期:2012-05-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB710603);交通部联合攻关科技项目(2009353342530);教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-07-0632)

作者简介:李聪(1985-),男,湖北监利人,工程师,博士,主要从事边坡稳定分析、非饱和岩土体渗流分析等方面的研究,(电话)027-82829737(电子信箱)23151112@qq.com。

这 2 个子系统之间的接触关系为滑动接触。采用条分法将滑动体分成一系列的滑块,滑块之间的接触关系为粘着接触。为简化模型,这 2 种接触关系均为面面接触。滑坡体的运动力学特性由牛顿力学定律来进行推导,对条块进行动力学分析,并结合相应的本构模型建立动力学方程,采用 matlab 编制程序按时步迭代求解动力学方程。

2.1 基本假定

(1) 滑体运动是一种连续可变的块体运动形式,这一点与连续可变块体理论相同。所谓“连续”是指在运动过程中各滑块间基本不存在宏观分离现象,而处于连续接触状态;所谓“可变”是指在运动过程中各滑块在宽度及高度上具有可变的特征,即可通过宽度的缩短实现高度的伸长,也可通过高度的缩短实现宽度的伸长。

(2) 滑体的运动过程是一个变形能积累和释放的过程。在运动过程中各滑块之间由于存在条间力而变形,从而产生变形能;反过来,变形能的变化引起条间力的变化,使得各滑块的加速度发生改变。

(3) 由于剪切带较薄,忽略该部分的变形能,仅计算由条间力改变引起的变形能。

(4) 滑块之间的条间力由滑块的宽度改变量产生,在弹性范围内,二者呈线性关系。

(5) 滑体内地下水位上升高度与降雨强度成正比,且坡体一维向上排水。本假设适用于存在地表裂隙和竖向排水通道的浅层堆积体。

2.2 模型的建立

假设滑坡为平面应变问题,滑裂面及滑道函数为 $b(x)$,将要失稳滑动时(即零时刻)的坡面函数为 $f_0(x)$, t 时刻的坡面函数为 $f(x)$ (图 1)。将滑体分为 n 块,其中 t 时刻任一滑块的受力情况如图 2 所示。其中 W_i 表示第 i 个滑块重量, P_i, P_{i+1} 分别表示总条间力, H_i, H_{i+1} 和 V_i, V_{i+1} 分别表示水平和垂直条间力分量; N_i, T_i 分别表示滑块与滑道间的法向力

和切向摩擦力, l_i 表示滑块滑动面长度; $z(t)$ 表示地下水水位以下的滑块高度; α_i 表示滑面倾角; d 表示剪切区厚度。设第 i 个滑块的原始宽度及高度分别为 b_{0i}, h_{0i} ; t 时刻的宽度及高度分别为 b_i, h_i ; 此时它具有速度 v_i , 加速度 a_i , 位置 x_i 。实际上除 W_i, b_{0i}, h_{0i} 外, 其他各量均为时间 t 的函数。

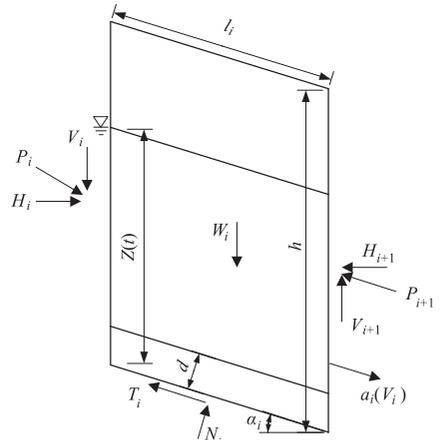


图 2 第 i 条块受力及运动分析
Fig. 2 Analysis on the forces acting on a typical slice and its movement

事实上,滑块间的条间力是由于滑块的速度不一使得滑块发生变形所致。同用于边坡稳定性分析的条分法一样,该问题仍然是高次超静定的,要求解该问题,需要补充一些方程。除了对于滑块底部所受到的支持力,我们通常假定它作用于底部的中点之外,对于条间力我们也需要作适当的假定。我们可以推广条分法的某些假定,此处采用不平衡推力法的作法并推广之,即:假定在整个滑坡过程中,条间力的合力始终与上一条土条底部的滑面(滑道)相平行,作用在条块高度的 $1/2$ 处,并认为水平条间力沿条块高度均匀分布。这样滑块之间可作如下简化:重量聚结在刚块上,刚块与刚块之间用无质量的弹簧连接,弹簧力表示条间力,弹簧的变形能表示滑块的变形能,弹簧的变形即为滑块的宽度改变量,如图 3 所示。

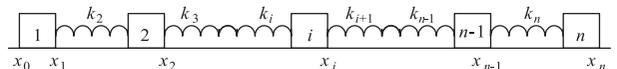


图 3 滑块-弹簧模型
Fig. 3 Simplified block-spring model

2.2.1 条间力计算

假定第 i 和 $i-1$ 个滑块之间的水平条间力分量 H_i 由第 i 个滑块的宽度改变量 s_i (以压为正)产生,在弹性范围内,二者呈线性关系为

$$H_i = k_i s_i \quad (1)$$

式中 k_i 即弹簧系数,下面寻找它的表达式。

由于前面已经假定滑块的变形能即弹簧的变形

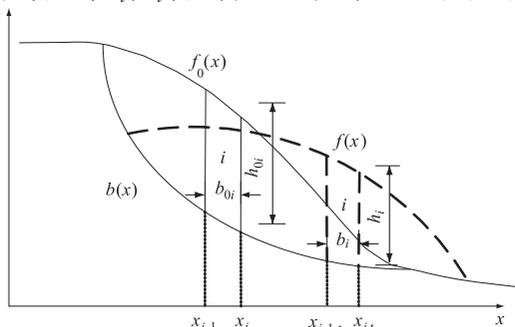


图 1 滑坡示意图^[6]

Fig. 1 Description of general landslide^[6]

能,那么首先求滑块的变形能。当滑块的宽度较小时,将其视为一个宽度为 b_{0i} ,高度为 h_{0i} 的矩形。由于条间力作用于高度的中间,则可认为它沿高度均匀分布,那么,水平向应力为

$$\delta = \frac{H_i}{h_{0i}}; \quad (2)$$

滑块的变形能为

$$e_h = \frac{\delta^2}{2E_{0i}} b_{0i} h_{0i} = \frac{H_i^2 b_{0i}}{2E_{0i} h_{0i}}; \quad (3)$$

滑块的宽度改变量为

$$s_i = \frac{\delta}{E_{0i}} b_{0i} = \frac{H_i b_{0i}}{E_{0i} h_{0i}}。 \quad (4)$$

式中: E_{0i} 为岩土体的变形模量,对分层岩土体,则取为各层的变形模量关于层厚的加权平均。而等效弹簧在具有 s_i 的长度改变时,所积存的变形能为

$$e_i = \frac{1}{2} k_i s_i^2 = \frac{k_i (H_i b_{0i})^2}{2(E_{0i} h_{0i})^2}; \quad (5)$$

令 $e_h = e_i$, 可得弹簧的弹性系数为

$$k_i = E_{0i} \frac{h_{0i}}{b_{0i}}。 \quad (6)$$

从而条间力可由式(1)计算。实际上,当滑体即将滑动时,滑块间已存在初始值 H_{0i} (后文讨论),则条间力应为

$$H_i = H_{0i} + k_i s_i。 \quad (7)$$

依据滑块-弹簧模型(图3)推导滑块的宽度改变量 s_i 的表达式,滑块宽度 b_i 可以表示为

$$b_i = x_i - x_{i-1}。 \quad (8)$$

式(7)中滑块的宽度改变量 s_i 是滑块宽度 b_i 随时间的改变量,则 s_i 可以表示为

$$s_i = b_{i,t} - b_{i,0} = (x_{i,t} - x_{i-1,t}) - (x_{i,0} - x_{i-1,0})。 \quad (9)$$

结合式(6)、式(7)、式(9)可以计算 t 时刻各个条块的条间力 H_i 。

条间力合力为

$$P_i = \frac{H_i}{\cos\alpha_{i-1}}。 \quad (10)$$

2.2.2 抗滑力计算

滑面上同时存在着孔隙水压力和接触压力(土力学中称为有效压力),采用摩尔-库仑准则计算抗滑力时,只考虑接触压力所产生的摩阻力,所以首先要弄清孔隙水压力的变化规律。

采用压力计直接量测孔隙水压力通常比较困难,下面我们讨论孔隙水压力 $p_w(t)$ 的简化计算方法。由于降雨与边坡位移有十分紧密的联系,所以我们可以采用降雨量代替地下水位的变化。Iver-

son^[8] 基于 Richard 公式提出了一个完整的数学模型来评价饱和和介质中降雨入渗过程。最近研究表明,由于浅层堆积体存在地表裂隙和较大的排水通道,监测位移对降雨响应十分迅速。因此假设地下水位上升高度 Δz 与降雨强度成正比。

$$\Delta z = \frac{I_{\text{rain}}/1\ 000}{n}。 \quad (11)$$

式中:降雨强度 I_{rain} 单位为 mm/d;对于多孔介质 n 假设为常数 0.15。

Hutchinson^[9] 和 Pastor^[10] 等人认为当滑体上部排水自由且坡体下部含有承压水时,可以假设坡体一维向上排水。基于 Hutchinson 和 Pastor 等人的工作,为简化计算假设固结过程为一维向上排水,我们采用太沙基一维固结理论来描述边坡滑塌过程中超孔隙水压力 $p'_w(t)$ 。

$$p'_w(t) = P'_{w0} \times e^{-\frac{t}{t_v}}; \quad (12)$$

P'_{w0} 为初始超孔隙水压力, t_v 为时间系数,

$$t_v = \frac{4H^2}{\pi^2 C_v}。 \quad (13)$$

C_v 是固结系数, t_v 控制超孔隙水压力的消散时间, $t_v = 1\text{ s}$ 对应瞬时消散过程, $t_v = 5 \times 10^6\text{ s}$ 对应慢固结过程。

结合式(11)、式(12)可计算孔隙水压力 $p_w(t)$, 即静水压力 $u(t)$ 与超孔隙水压 $p'_w(t)$ 之和。

$$p_w(t) = u(t) + p'_w(t)。 \quad (14)$$

滑块底滑面的法向力 N_i 与滑块重力 W_i (地下水以下采用饱和重度)、条间力 H_i 、孔隙水压力 $p_w(t)$ 有关,

$$N_i = W_i \cos\alpha_i + P_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - p_w(t) l_i; \quad (15)$$

根据摩尔-库仑准则给出抗滑力 T_i , 即

$$T_i = c' l_i + N_i \tan\varphi'。 \quad (16)$$

另外,当水库库岸发生滑坡,滑坡体冲入水库中,则迎水面还受到水的阻力。此力取决于滑速及迎水面积,可以用绕流阻力公式估算,即

$$R = C_D A \frac{\gamma_0 v^2}{2g}。 \quad (17)$$

式中: A 为迎水面积; v 为滑速; γ_0 为水的重度; C_D 是粘滞阻力系数,可取 $1.5 \sim 2$ ^[11]。

2.2.3 滑块动力学分析

考虑孔隙水压力和粘滞力的影响,对第 i 个条块进行动力学分析(图2),依据牛顿运动定律写出条块的动力平衡方程。

$$F - F_r = F_i + F_v。 \quad (18)$$

式中: F 表示所选条块重力和接触力 P 共同作用产

生的下滑力,接触力 P 的作用方向采用剩余推力法中的假设; F_r 是根据摩尔 - 库仑准则给出的抗滑力,当滑体入水后还应加上水产生的阻力,水的阻力按式(17)计算; F_i 表示惯性力; F_v 是采用 Bingham 模型^[1]给出的剪切区与应变速率有关的粘滞力。滑面方向的动力平衡方程如下:

$$W_i \sin \alpha_i + P_i \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - P_{i+1} - \left[c' \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + (W_i \cos \alpha_i + P_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - p_w(t) \times \frac{b_i}{\cos \alpha_i}) \tan \varphi' \right] = m_i a(t) + \frac{\eta}{d} v(t) \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (19)$$

式中: b_i 为滑块宽度; η 为剪切区的粘滞系数; d 为剪切区厚度; 当滑体进入水中,抗滑力 F_r 还应加上水的阻力,水的阻力按式(17)计算。

如果 t 时刻每个滑块的条间力已知,那么可以由式(19)算出 t 时刻的加速度 a_i 。设时间步长 Δt 很小,那么认为在 $t \sim (t + \Delta t)$ 时段内加速度不变,则 $t + \Delta t$ 时刻的速度为

$$v_{i,t+\Delta t} = v_i + a_i \Delta t \quad ; \quad (20)$$

$t + \Delta t$ 时刻的位置为

$$x_{i,t+\Delta t} = x_{i,t} + 0.5(v_i + v_{i,t+\Delta t}) \Delta t \cos \alpha_i \quad (21)$$

此时滑块的宽度 $b_{i,t+\Delta t}$ 可以按式(8)计算,而此时滑块的高度为

$$h_{i,t+\Delta t} = C \frac{V_{0i}}{b_{i,t+\Delta t}} \quad (22)$$

式中: $V_{0i} = h_{0i} b_{0i}$, 为第 i 个滑块的体积; C 为体积变化系数,目前暂不考虑此项修正,即取 $C = 1$ 。

通过以上公式求得 $t + \Delta t$ 时刻的各状态量后代入式(19)可以算出 $t + \Delta t$ 时刻的加速度,依次按时步进行迭代,当所有滑块的速度都为零时,滑坡中止。

2.2.4 初始条件

本文选取坡体从静止阶段进入滑动阶段的临界状态作为计算的初始条件,采用不平衡推力法计算初始条间力。不平衡推力法公式如下:

$$P_{i+1} = W_i \sin \alpha_i - \left(c' \frac{b_0}{\cos \alpha_i} + (W_i \cos \alpha_i - p_w(t) \frac{b_0}{\cos \alpha_i} \tan \varphi') / K_s + P_i \psi_i \right) \quad ; \quad (23)$$

$$\psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \tan \varphi' \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) / K_s \quad (24)$$

式中: ψ_i 为传递系数, K_s 为安全系数,计算中取 $|K_s - 1| \leq 0.05$ 作为边坡进入临界状态的标准。并认为土条之间不承受拉力,当任何土条的推力 F_i 出现负值时,就意味着 F_i 不再向下传递,在计算下一块土条时,上一块土条的推力取 0。

2.3 模型求解

采用 matlab 编制程序按时步迭代求解动力学方程,计算流程如图 4 所示。

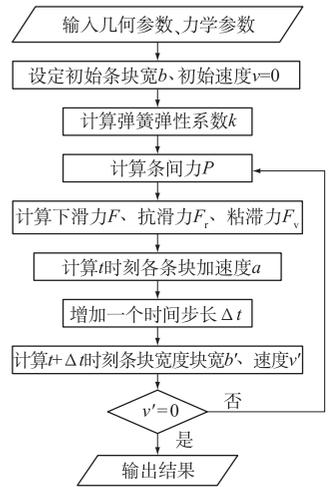


图 4 模型求解流程图

Fig. 4 Flow chart of solving the prediction model

3 计算实例

利用上述模型对三峡库区千将坪滑坡进行了数值模拟。千将坪滑坡是以后部推移为主、前部牵引为辅的复合破坏形式的顺层基岩滑坡。根据滑坡后壁光面长度及边界公路等标志物的错动距离,滑坡的滑距为 100 m,垂直滑距在 75 m 以上^[12]。滑坡体大部分为老滑坡堆积体,主要为残坡积层、强风化岩土层、砂泥岩层,结构松散破碎,发育一组垂直节理,产状为 $240^\circ \angle 80^\circ$ 。图 5 为该滑坡地质剖面图,图 6 给出了滑坡体地形与地质特征示意图。滑体的地

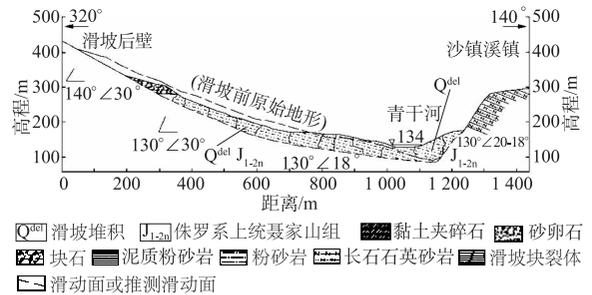


图 5 千将坪滑坡地质剖面图^[3]

Fig. 5 Geological profile of Qianjiangping landslide^[3]



图 6 千将坪滑坡体地形与地质特征示意图^[3]

Fig. 6 Topography and geological conditions of Qianjiangping landslide^[3]

质特征可以较好地满足降雨入渗条件和一维向上排水假设。

选取较为典型的千将坪滑坡纵剖面作为计算断面,长 1 300 m,高 400 m,模拟时取千将坪滑体的断面如图 7 所示,将滑前滑体沿滑动方向等距分为 112 块,每个条块宽度为 10 m,从坡顶向坡脚顺序编号。计算采用文献[6]中蓄水和降雨条件下降低后的滑面抗剪强度参数,参数见表 1。考虑库水位为 134 m,时间步取 0.01 s。

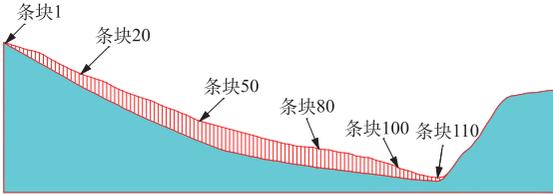


图 7 千将坪滑坡模型条块划分图

Fig. 7 Diagram of slices of Qianjiangping landslide model

表 1 滑坡力学参数取值

Table 1 Mechanical parameters of landslide

参数	量值	参数	量值
滑体重度 $\gamma/(N \cdot m^{-3})$	25 000	滑体泊松比 μ	0.35
滑体饱和重度 $\gamma_{sat}/(N \cdot m^{-3})$	27 000	滑面黏聚力 c'/MPa	0.02
滑体弹性模量 E/GPa	0.8	滑面摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$	14
剪切区厚度 d/m	0.4	粘滞系数 $\eta/(Pa \cdot s)$	7×10^9

采用上述模型对千将坪滑坡滑动演化的全过程进行了模拟研究,图 8 绘制了滑动过程中不同时刻的坡面形状。图 9 给出了不同滑块速度的历时曲线。从图 9 中可以看出滑体整个滑动过程持续约 50 s,加速运动约 30 s 后开始减速运动;加速过程中各滑块基本呈现出整体滑动趋势,而当速度大于 2 m/s 后,各条块的速度出现较大的波动,这是由于滑面为一曲面,当滑体滑距足够大后,受到底滑面坡角变化的影响,滑块的加速度表现出一定的震荡特性。位于滑体前缘的第 110 个条块最大速度达到 13 m/s,与微震台网监测分析成果(16 m/s)较为接近。而位于滑体中部的第 50 个条块最大速度为 5.3 m/s,滑体中部滑动速度波动相对较小,滑动过程平稳。

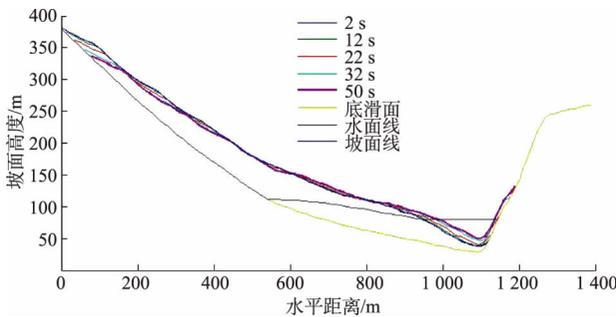


图 8 千将坪滑坡不同时刻的坡面形状

Fig. 8 Surfaces of Qianjiangping landslide at distinct times

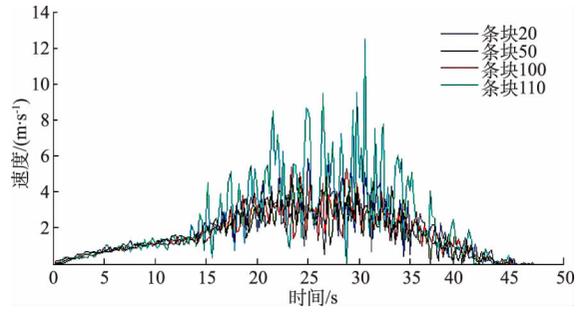


图 9 千将坪滑坡滑体运动历时曲线

Fig. 9 Curves of sliding speed versus time for different blocks of Qianjiangping landslide

图 10 给出了不同滑块滑距的历时曲线。从图 10 中可以看出位于滑体前缘的第 111 个条块最大滑距达到 112 m,位于滑体后缘的第 1 个条块最大滑距达到 86 m,而位于滑体中部的第 50 个条块最大滑距为 79 m,结果与文献[12]中的实际滑距较为接近。滑体前缘滑距比中部大,表明中前部岩土体在滑坡发生后处于松弛甚至拉伸的状态,更易呈现出颗粒流动的状态。

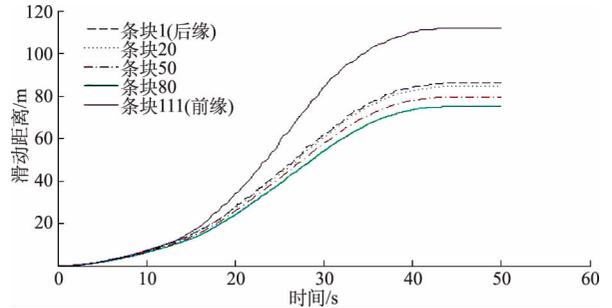


图 10 千将坪滑坡不同块体滑行距离

Fig. 10 Curves of sliding distance versus time for different blocks of Qianjiangping landslide

4 结 语

基于垂直条分法和条块连续变形假定,结合牛顿运动定律,对滑坡进行动力学分析,提出了一种新的边坡演化动力学预测模型。利用该模型不仅可以模拟滑坡运动的全过程,并预测其危害范围;而且可以通过降雨和蓄水作用引起强度参数的折减和孔隙水压力的改变,来模拟滑坡启动前从稳定到破坏的演化过程。本文提出的计算模型算法简单,计算速度快,计算结果与实际情况较为接近,因此该模型有较大的应用工况价值。

另外,模拟计算中,参数的确定对模拟结果有很大的影响,参数的选取最好通过对已有条件类似的滑坡进行反演得到。

参考文献:

- [1] HERRERA G, FERNANDEZ-MERODO J A, MULAS J, *et al.* A Landslide Forecasting Model Using Ground Based SAR Data: The Portalet Case Study[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(3/4): 220 – 230.
- [2] SORNETTE D, HELMSTETTER A, ANDERSEN J V, *et al.* Towards Landslide Predictions: Two Case Studies [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 338(3/4): 605 – 632.
- [3] 邹爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(7): 1297 – 1303. (WU Ai-qing, DING Xiu-li, LI Hui-zhong, *et al.* Numerical Simulation of Startup and Whole Failure Process of Qianjiangping Landslide Using Discontinuous Deformation Analysis Method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7): 1297 – 1303. (in Chinese))
- [4] 兰恒星, 伍法权. 基于条分法的滑坡位移非线性动力学模拟方法[J]. *工程地质学报*, 2000, 8(3): 374 – 378. (LAN Heng-xing, WU Fa-quan. A Non-linear Dynamic Modeling Method for Landslide Displacement based on Slice Method [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(3): 374 – 378. (in Chinese))
- [5] HUNGR O. A Model for the Runout Analysis of Rapid Flow Slides, Debris Flows, and Avalanches[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 610 – 623.
- [6] MIAO Tian-de, LIU Zhong-yu, NIU Yong-hong, *et al.* A Sliding Block Model for the Runout Prediction of High-Speed Landslides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(2): 217 – 226.
- [7] 代云霞, 殷坤龙, 汪 洋. 滑坡速度计算及涌浪预测方法探讨[J]. *岩土力学*, 2008, 29(增): 407 – 411. (DAI Yun-xia, YIN Kun-long, WANG Yang. Discussion on Method of Landslide Velocity Calculation and Surge Prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(Sup.): 407 – 411. (in Chinese))
- [8] IVERSON R M. Landslides Triggering by Rain Filtration [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1897 – 1910.
- [9] HUTCHINSON J N. A Sliding-Consolidation Model for Flow Slides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1986, 23(2): 115 – 126.
- [10] PASTOR M, QUECEDO M, FERNÁNDEZ-MERODO J A, *et al.* Modelling Tailing Dams and Mine Waste Dumps Failures[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(8): 579 – 591.
- [11] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980. (PAN Jia-zheng. *Anti-sliding Stability and Landslide Analysis for Buildings* [M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980. (in Chinese))
- [12] 廖秋林, 李 晓, 李守定, 等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3146 – 3153. (LI AO Qiu-lin, LI Xiao, LEE S, *et al.* Occurrence, Geology and Geomorphology Characteristics and Origin of Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area and Study on Ancient Landslide Criterion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3146 – 3153. (in Chinese))

(编辑:王 慰)

A Dynamic Prediction Model Based on Slice Method for the Evolution of Slopes

LI Cong^{1,3}, JIANG Qing-hui^{2,3}, ZHU Jie-bing¹, ZENG Ping¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: On the basis of traditional slice method and assuming that the deformation of slice is continuous, a dynamic prediction model for the evolution of slopes is developed. In the model, the groundwater level variation caused by rainfall is taken into account, and the dissipation of the excess pore-fluid pressure in the saturated layer is governed by Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. It is believed that the speed and deformation of the sliding mass are of inhomogeneity, and the changes of inter-slice forces are caused by the deformation of slice. Through dynamics analysis of landslide using Newton's laws of motion, the new model can simulate the whole sliding process and predict the maximum sliding speed and maximum sliding distance. The model is adopted to simulate the movement process of Qianjiangpin landslide, and the result of computer simulation is in well accordance with actual cases.

Key words: slope; prediction; velocity of landslide; dynamics; slice method