

滑坡中短期预测方法的研究

A STUDY ON MIDDLE AND SHORT TIME PROGNOSIS OF LANDSLIDES

王建国

Wang Jianguo

(工程力学研究所)

摘要 本文详细分析了岩体蠕变变形发展三个阶段的基本特征,提出一种摩擦元件和阻尼元件并联的滑坡中短期预报模型。滑坡发生在加速蠕变阶段,可以用反映摩擦特性和阻尼特性的材料参数不断恶化(文中假设线性变化)予以反映。最后,用三个滑坡实测数据对模型进行了检验。

关键词 滑坡; 中短期预报; 稳定蠕变; 加速蠕变; 摩擦元件; 阻尼元件

中图法分类号 P642.22; TV698.232

ABSTRACT The fundamental characters at three stages of creep deformation of rock masses are discussed. A model, a friction element and a dashpot element connected in parallel, suitable for middle and short time prognosis is suggested—— landslide happens at accelerated creep stage and its mechanism may be described by progressive deterioration (assuming linear change with time) of material parameters which denote the friction and the dashpot of rock masses. The verification for the model is carried out by comparing the theoretical results with the measured results of three typical landslides.

KEY WORDS landslides; middle and short prognosis; stable creep; accelerated creep; friction element; dashpot element

1 引言

滑坡是一种重要的常见山地地质灾害,威胁着工程建筑(如铁路、公路、航运和水电工程等)和人民生命财产的安全。对滑坡机理进行深入研究,监测潜在滑移体,及时分析监测资料,运用较好的预测预报模型,预报滑移阶段和爆发时间,可使人类主动采取预防措施,防止滑坡或减轻因滑坡造成的损失。滑坡形成的外部因素很多,例如降雨、洪水、地震和构造地质作用,还有人类日益加强的工程活动(边坡开挖、水库蓄放水导致的地下水位变化、大药量爆破)。但归根到底,滑体滑面材料本身性质的变化是产生滑坡的物理原因,其它因素仅是外部因素^[1,2]。

滑坡发生时间的预测预报研究已经取得了一定进展^[3~8]。1968年,日本学者斋藤道孝基于

* 收文日期 1990-12-13

国家自然科学基金委青年基金资助

岩体加速蠕变的经验微分方程,提出一种滑坡灾害爆发时间预报模型;苏受军等(1990)根据室内岩土试验资料及数个滑坡监测资料进行数值分析的结果,提出加速蠕变规律服从双曲线关系^[3]:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{at}{b-t} \quad (1)$$

近年来,用邓聚龙教授(1980)提出的灰色系统理论预测滑坡爆发时间取得了较大进展^[5-7]。有的用多种方法进行预测,提高预测精度,例如中国地质大学晏同珍教授分别用回归分析方法(用二次曲线拟合)和灰色控制理论求解维尔哈斯特(verhulst)的生物繁衍模型方法,对比研究了“滑坡爆发时间”,提出一种新思路^[6]。

上面多种方法虽然在某方面取得进展,但或具有经验性或对滑移过程的物理机制理解不够,严格说来不具有普遍性。本文首先对岩体蠕变变形特征进行分析,提出由阻尼元件和摩擦元件并联组成的中短期预报模型,用以描述单体或松散体蠕变滑坡的稳定蠕变和加速蠕变阶段的物理过程,预测爆发时间,最后用三个滑坡实例对模型预测能力进行了检验。

2 考虑稳定蠕变和加速蠕变物理模型

试验研究表明,岩石的蠕变可以划分为三个阶段:初始蠕变、稳定蠕变和加速蠕变至破坏。常应力作用于岩石试件上,产生一瞬间变形,随时间增长,变形增加,曲线呈凸形,这部分蠕变(图1中AB段)称为初始蠕变或过渡蠕变。随后,曲线接近于直线状(图1中BE段),这部分蠕变称为第二蠕变或稳定蠕变,最后蠕变加速(图1中EI段)导致破坏,这部分蠕变称为加速蠕变。

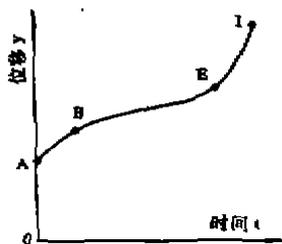


图1 岩石蠕变曲线

AB—初始蠕变 BE—稳定蠕变
EI—加速蠕变

岩体作为一种结构体,蠕变规律远较岩石的复杂,且并非所有的蠕变都要经历三个阶段,这要视具体的滑动结构特征和滑动的环境条件而定。应当说,大多数滑移在第二阶段就稳定下来(这种稳定可由工程加固或卸荷处理措施予以控制),只有滑移体边界条件和外部作用条件足以使滑移体蠕变进入加速蠕变阶段,滑坡爆发才成为可能。已有的研究表明,实测滑移体的位移时间关系曲线和岩石的蠕变曲线有相同的形式^[4],这就为我们根据岩石蠕变规律推测岩体蠕变规律提供了依据。

滑坡中短期预报的任务是在加速蠕变阶段获取资料,预测爆发时间。如何从位移时间曲线上判别滑移进入加速蠕变阶段是一个重要的问题。文献[4]对此作了详细研究:对国内外十余个有完整系统状态历时曲线的岩体失稳实例,分类进行了分析整理,得出“直线与曲线交界处即是进入蠕变加速状态起点”的结论。因此,我们设计一种滑坡中短期预测模型,由摩擦元件 F 和阻尼元件 η 并联组成,见图2(值得说明的是,暂不考虑弹性元件,这对本问题还是足够精确), W 表示滑动力,不计滑动加速度的影响,有下列关系式成立:

$$W = \eta^*(t) \cdot \frac{dy}{dt} + F^*(t) \quad (2)$$

两边变形有:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{W - F(t)}{\eta(t)} \quad (3)$$

其中

$$F(t) = \frac{F^*(t)}{W} \quad \eta(t) = \frac{\eta^*(t)}{W} \quad (4a, b)$$

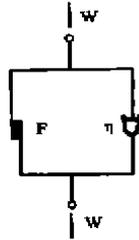


图2 滑坡中短期预报模型

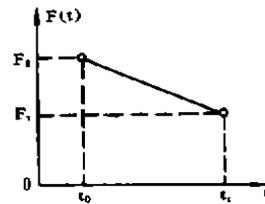


图3 滑面材料性质线性恶化

y 表示滑移体的位移， $F^*(t)$ 表示阻滑力， $F(t)$ 表示近似宏观意义上的摩擦系数，它主要取决于滑动面上岩体材料的摩擦、断裂和小颗粒的滚动等，随着滑动速率的加快而逐渐减小直至等于动摩擦系数； $\eta(t)$ 反映岩体滑动面内的流变性质，主要受岩体粘滞性质的影响。稳定蠕变过程中， $F(t)$ 和 $\eta(t)$ 近似保持常数，这时由(3)式知 y 和 t 呈直线关系，与实际观测的位移历时曲线相符^[4]。

由稳定蠕变过渡到加速蠕变，可以用滑动面上材料物理力学性质变化来反映。即 $F(t)$ 、 $\eta(t)$ 在不断变化，阻尼元件承受的力逐渐加速转移给摩擦元件，且摩擦元件性质也在恶化。记加速蠕变起始时刻 t_0 时有关参数如下：

$$F(t_0) = F_0 \quad \eta(t) = \eta_0 \quad (5)$$

滑坡爆发时刻 t_1 的有关参数如下：

$$F(t_1) = F_1 \quad \eta(t_1) = \eta_1 \quad (6)$$

并假定两个时刻之间按线性规律过渡：

$$F(t) = F_1 + \frac{F_0 - F_1}{t_1 - t_0}(t_1 - t) \quad (7a)$$

$$\eta(t) = \eta_1 + \frac{\eta_0 - \eta_1}{t_1 - t_0}(t_1 - t) \quad (7b)$$

将(7a,7b)式代入(3)式并整理有：

$$\frac{dy}{dt} = \frac{(1 - F_1)(t_1 - t_0) - (F_0 - F_1)(t_1 - t)}{\eta_1(t_1 - t_0) + (\eta_0 - \eta_1)(t_1 - t)} \quad (8)$$

滑动爆发时， \dot{y} 近似为零，式(8)简化为：

$$\frac{dy}{dt} = \frac{A - B(t_1 - t)}{t_1 - t} \quad (9)$$

其中 $A = (1 - F_1)(t_1 - t_0)/\eta_0$ $B = (F_0 - F_1)/\eta_0$ (10a, b)

方程(9)就是我们根据加速流变学模型提出的中短期滑坡预报方程。

3 滑坡爆发时间预报

利用实测资料的初始条件,如 $y|_{t=t_0} = y_0$, 求解方程(9)可以得到:

$$y = y_0 + A \ln \frac{t_r - t_0}{t_r - t} - B(t - t_0) \quad (11)$$

现在简单分析一下方程(11)。可以证明,只要 $F_0 < 1$, 必有 $\frac{dy}{dt} > 0$, $\frac{d^2y}{dt^2} > 0$; 且当 $t \rightarrow t_r$ 时 $\frac{dy}{dt} \rightarrow \infty$, $y \rightarrow \infty$, 这时滑坡完全爆发。由此可见,方程(11)适用于单体加速蠕变滑移阶段的一般规律。根据野外监测数据,可以方便地确定 A 、 B 和 t_r 参数。有两种方法可供采用。

3.1 作图外延法

由(9)式知, $\frac{dy}{dt}$ 在 $t = t_r$ 点值无穷大,也就是说 $t = t_r$ 线是 $\frac{dy}{dt} \sim t$ 的渐近线,实际上也是 $y \sim t$ 的渐近线。根据实测数据对,在 $\frac{dy}{dt} \sim t$ 平面内绘制 $\frac{dy}{dt} \sim t$ 关系曲线(或在 $y \sim t$ 平面内绘制 $y \sim t$ 曲线),可以从曲线变化趋势大致确定爆发时间 t_r 。

3.2 最小二乘法

设实测数据对 (y_i, t_i) , 相应取权函数 w_i (以消除观测误差和随机性) ($i = 1, 2, \dots, n$), 则理论值与实测值差的加权平方和为:

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=1}^n w_i (y_i - y^{\circ})^2 \\ &= \sum_{i=1}^n w_i [y_0 - y^{\circ} + A \ln \frac{t_r - t_0}{t_r - t_i} - B(t_i - t_0)]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

通过优化选取待定参数 A 、 B 和爆发时间 t_r , 使得 $Q = Q_{\min}$ (注:(12)式中的 t_0 只要是加速蠕变阶段内任一点的 t 即可,不一定要求 t_0 是加速蠕变起始时间。这点与(5)式要求的不同)。

4 模型的验证

4.1 三个典型滑坡实测数据^[3,4]

4.1.1 黄龙西村黄土高势能滑坡

发生于1963年9月27日17时。滑坡基底为花岗闪长岩,滑体约 $3.9 \times 10^5 \text{m}^3$, 滑体前缘抵达渭河,破坏铁路建筑物、覆盖部分村舍农田。

4.1.2 著名的意大利瓦扬特滑坡

发生于1963年10月9日22时38分。属碳酸岩及泥灰岩的顺层滑坡,滑体约 $2.6 \times 10^8 \text{m}^3$ 。滑坡(近坝址区)造成水库堵塞,坝前涌浪超越坝顶100~200米,下游罗加隆镇2900名居民全部丧生。尽管事故发生后坝体安然无恙,但堵塞已使当时世界最高的双曲拱坝完全失效。

4.1.3 长江西陵峡新滩松散体滑坡^[5]

发生于1985年6月12日凌晨3时45分。滑动面系松散堆积物与志留系砂页岩接触面,属加载型滑坡。滑体约 $3 \times 10^7 \text{m}^3$, 前缘约 $2.6 \times 10^6 \text{m}^3$ 入江并引起涌浪使小船失去平衡,船民死10人,失踪2人。由于岩崩调查处和长办及时预报,滑体前缘新滩镇1371人安全撤离,无一人直接伤亡。

三个滑坡位移——历时实测数据*

滑坡名称	时间坐标(天)	监测日期 年 月 日	代表性测点 位移量 (m)	实测滑坡 爆发时间
黄龙西村黄土滑坡	22	1963 9 22	0.025	1963年9月27日 17时
	23	1963 9 23	0.032	
	24	1963 9 24	0.055	
	25	1963 9 25	0.100	
	26	1963 9 26	0.300	
	27	1963 9 27	0.600	
意大利瓦扬特滑坡	8	1963 9 25	0.080	1963年10月9日 22时38分
	14	1963 10 1	0.200	
	18	1963 10 5	0.300	
	20	1963 10 7	0.400	
	21	1963 10 8	0.500	
西陵峡新滩松散体滑坡	11	1985 1 11	2.056	1985年6月12日 凌晨3时45分
	34	1985 2 4	2.237	
	72	1985 3 13	2.417	
	99	1985 4 9	2.552	
	134	1985 5 14	2.915	
	161	1985 6 10	5.378	

* 本表摘自文献[3]

4.2 模型预测结果

拟合实测数据对得到位移历时关系式如下:

4.2.1 黄龙西村黄土滑坡

以9月22日实测值作起点拟合

$$y = 2.5 + 24.09 \ln \frac{5.501}{27.501 - t} - 0.8(t - 22) \quad \text{cm} \quad (13)$$

预报爆发时间:9月27日12时

以9月24日实测值作起点拟合

$$y = 5.5 + 34.09 \ln \frac{3.701}{27.701 - t} - 0.8(t - 24) \quad \text{cm} \quad (14)$$

预报爆发时间:9月27日16时48分。与实测爆发时间相当接近。由此也可见,不断更新数据对,去掉明显是稳定蠕变段的数据对,可以提高预报精度。理论曲线与实测点比较见图4。

4.2.2 意大利瓦扬特滑坡

$$y = 8 + 30 \ln \frac{14.95}{22.95 - t} - 1.4(t - 8) \quad \text{cm} \quad (15)$$

预报爆发时间:10月9日22时48分。

4.2.3 西陵峡新滩松散体滑坡

$$y = 2.056 + 0.96 \ln \frac{152}{163 - t} - 5.56 \times 10^{-3}(t - 11) \quad m \quad (16)$$

预报滑坡时间:6月13日零时。

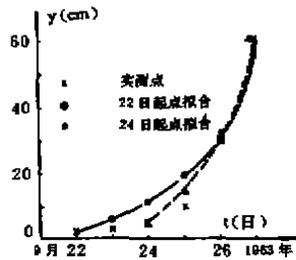


图4 黄龙西村黄土滑坡

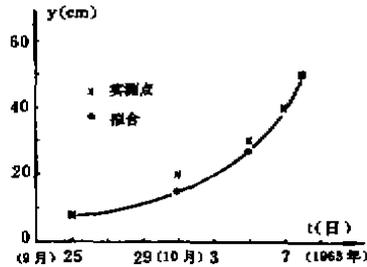


图5 意大利瓦扬特滑坡

5 结 论

通过前面的理论分析和实例检验,可以得到结论:

1) 岩土体的流变性质在滑坡爆发时间预测中起着重要作用。本文以岩体稳定蠕变和加速蠕变物理特性为基础提出的滑坡中短期预报模型,具有较明确的物理意义。经三个实例验证,模型具有良好精度。

2) 岩体是一种复杂的地质结构体。严格论,应该用地质结构分析的方法求解滑坡问题。本文在提出的摩擦—阻尼并联模型基础上,假设摩擦系数和阻尼系数在加速蠕变阶段线性恶化。这种处理滑坡爆发时间预测问题的办法是可行的,也为滑坡形成与发展机理研究提供一种可能的深入途径。

3) 区分稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段对提高模型预测精度是非常重要的(如图4所示)。即使在加速蠕变阶段,也可以通过不断更新实测位移历时数据对来提高预测精度。

应当指出,本文模型适用于单体单向蠕变滑坡。对更复杂情况,有待实测资料检验。

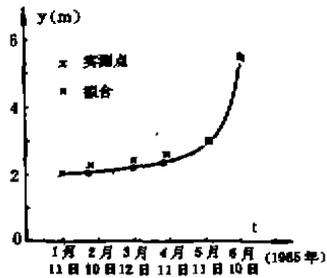


图6 西陵峡新滩松散体滑坡

参 考 文 献

- 1 张清. 岩石力学基础, 北京, 中国铁道出版社, 1986
- 2 丰定祥、吴家秀、葛修润. 边坡稳定性分析中几个问题的探讨, 岩土工程学报, 1990, 12(3): 1-9
- 3 苏爱军、冯宗礼. 滑坡预报方法探讨, 水文地质工程地质, 1990, (5): 50-51
- 4 张倬元、黄润秋. 岩体失稳前系统的线性与非线性状态及破坏时间预报的“黄金分割数”法. 全国第三次工程地质大会论文集, 成都, 成都科技大学出版社, 1988, 下册: 1233-1240
- 5 晏同珍. 滑坡发生时间的预测预报, 滑坡论文选集, 成都, 四川科学技术出版社, 1989: 216-222
- 6 陈明东、王兰生. 边坡变形破坏的灰色预报方法, 全国第三次工程地质大会论文集, 成都, 成都科技大学出版社, 1988, 下册: 1223-1232
- 7 付冰清、周明文. 滑坡时间预报的研究, 岩土力学新分析方法讨论会论文集, 上海, 中国力学学会岩土专业委员会、同济大学岩土工程研究所, 1989, 12, 下册: 313-322
- 8 薛果夫、吕贵芳、任江. 新滩滑坡研究, 中国典型滑坡, 北京, 科学出版社, 1988, 200-210