

# 平推式滑坡后缘启动水头探讨

赵 勇, 许 模, 赵 红 梅

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**平推式滑坡是一类特殊的斜坡失稳模式,通常规模较大,滑面倾角极缓甚至反倾坡内,其失稳机理也与传统的极限平衡理论相悖,因此此类滑坡的启动判据是研究重点和关键。在平推式滑坡形成条件及启动过程分析基础上,运用偏最小二乘法回归分析已有滑坡数据,获得滑动时临界水头统计模型,进而与通过力学分析得到的启动判据模型进行综合对比,发现力学模型优于统计模型,最终选择力学模型,并通过实例分析启动判据的应用效果。

**关 键 词:**平推式滑坡; 偏最小二乘法; 回归分析; 力学分析; 启动判据

**中图法分类号:** P642.22      **文献标志码:** A

20 世纪 80 年代以来,在四川盆地发生了多起由暴雨诱发的一类特殊斜坡破坏模式,经分析,这类滑坡的滑面倾角极缓甚至反倾坡内,按照传统的极限平衡理论,这类滑坡是很难形成的。故在近 20,30 a 中,此类斜坡破坏形式逐渐受到各方学者的重视,从而得到了深入的研究。如王兰生等通过大量实例研究分析,尤其是通过对 1981 年 7~9 月四川盆地暴雨诱发的大量滑坡的研究<sup>[1]</sup>,提出了平推式滑坡的形成机理。殷坤龙等通过对万州区近水平地层的滑坡成因机制的研究<sup>[2]</sup>,指出水在此类滑坡中起着非常重要的作用。孔纪名和陈自生对 1987 年夏季暴雨诱发的川东地区的红层滑坡进行分析<sup>[3]</sup>,发现规模较大、危害大的滑坡都具有平推式特征。黄润秋等指出,在平推式滑坡中地下水的顶托<sup>[4-5]</sup>、水垫效应以及裂隙水压力对构造裂隙的“楔裂”、“撕开”作用是主导作用等。2004 年的四川宣汉天台乡滑坡,是近年平推式滑坡的典型代表,其规模巨大,堵江淹镇,造成了巨大的损失,故对平推式滑坡的研究依然应该得到重视。

由于水在平推式滑动中扮演着“幕后推手”的角色,故人们对平推式滑动的关注重点为:潜在滑坡后缘在何处,后缘需要多高的水头  $h_{cr}$  才能有足够的初始启动作用力。对于这两个问题,作者通过文献调研,发现

国内外学者鲜有研究,而多进行的是其形成机制的物理模拟和数值模拟研究<sup>[2,6-7,9]</sup>,尤其未对平推式滑坡的启动判据统计模型进行过探讨。本文力图对此进行探索,通过对前人资料的收集,利用偏最小二乘法和回归分析,探讨启动水头 ( $h_{cr}$  (m)) 对各变量(滑坡跨度  $L$  (m)、滑带倾角  $\alpha$ 、内摩擦系数  $\tan\varphi$ ) 的响应,并与王兰生等提出的启动判据进行对比,综合比选模型,最后通过实例分析启动判据的应用效果。

## 1 平推式滑动模式的形成条件及过程分析

### 1.1 平推式滑动形成条件

平推式滑坡的产生是需要一定条件的。① 岩体结构特征:软硬相间的岩层,岩层倾角较平缓,较软弱岩层的厚度较薄,隔水条件较好。② 滑动触发因素:雨季特大暴雨或者持续暴雨条件。③ 一定的水力条件:当后缘拉裂缝中的充水高度达到一定值时、且两侧排水条件不够将水排出。随着滑动,后缘拉陷槽水位下降,静水压力逐渐变小,当静水压力消失后,滑动也逐渐停止。

### 1.2 平推式滑动形成过程分析

在近平层状斜坡体中,可以将平推式滑动模式

的形成过程分为 4 个阶段,如图 1 所示:① 雨水下渗汇聚,在特大暴雨或者持续暴雨条件下,地表水通过坡表的残积层渗入砂岩及泥岩层内的风化裂隙或构造裂隙中;② 滑移(或塑流)<sup>[10]</sup>,软弱岩层由于水岩相互作用,发生泥化软化现象,在上覆岩层重力作用下,向临空方向发生滑移或塑性挤出;③ 压制拉裂(或重力拉裂)<sup>[10]</sup>,由于下伏软弱岩层的挤出,造成上覆岩层底板临空,在重力矩以及上覆岩层在软硬岩层间产生摩擦约束力而诱发的拉应力作用下<sup>[11]</sup>,在坡体内形成贯通的拉裂缝;④ 充水滑动解体,在足够降雨强度的情况下,后缘拉裂缝内和滑动面充水,当后缘充水高度达到某阈值时,在后缘裂缝中的充水静水压力以及沿滑移面的扬压力共同作用下,滑体发生滑动。

应当指出,平推式滑坡的形成是一个累进性破坏的过程,其 4 个发展阶段是相互衔接的,只有当某个斜坡的 b、c 阶段发展到相当程度(后缘拉裂面贯通),才能在暴雨作用下,发生失稳。

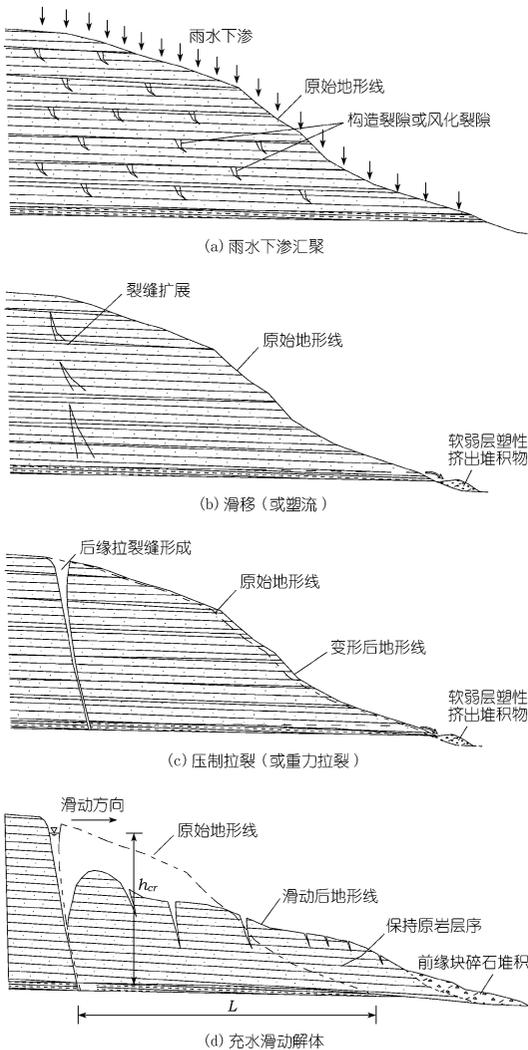


图 1 平推式滑动模式的形成过程示意

## 2 利用偏最小二乘法回归估计临界启动水头

### 2.1 偏最小二乘法回归分析模型

回归分析是研究因变量对自变量依赖关系的一种统计分析方法<sup>[12]</sup>,目的是通过自变量的给定值来估计或预测因变量的均值。利用回归分析方法可以建立因变量与自变量间的函数关系。

偏最小二乘法对小样本的数据集合进行回归分析有着很大的优势,它通过主成分提取,可以剔除一些干扰成分,将多元线性分析、变量的主成分分析和变量间的典型相关分析有机地结合起来,在同一算法下,同时实现回归建模、数据结构简化和两组变量间的相关分析。

偏最小二乘回归的建模步骤如下<sup>[12]</sup>:

(1) 将  $X$  和  $y$  进行标准化处理,得到标准化的自变量矩阵  $E_0$  和因变量矩阵  $F_0, x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k, E_0 = (x_{ij}^*)_{n \times p}, F_0 = (\frac{y_i - \bar{y}}{s_y})_{n \times 1}, i = 1, 2, \dots, n$ 。式中,  $\bar{x}_j$  是  $X_j$  的均值,  $s_j$  是  $X_j$  的标准值;  $\bar{y}$  是  $y$  的平均值;  $s_y$  是  $y$  的标准差。

(2) 从  $E_0$  中抽取一个成分,  $t_1 = E_0 w_1$ , 其中:  $w_1 = \frac{E_0' F_0}{\|E_0' F_0\|}$ , 且  $\|w_1\| = 1$ , 实施  $E_0$  和  $F_0$  在  $t_1$  上的回归,  $E_0 = t_1 p_1 + E_1, F_0 = t_1 r_1 + F_1$ , 式中  $p_1, r_1$  是回归系数( $r_1$  是标量), 即:  $p_1 = \frac{E_0' t_1}{\|t_1\|^2}, r_1 = \frac{F_0' t_1}{\|t_1\|^2}$ , 记残差矩阵:  $E_1 = E_0 - t_1 p_1, F_1 = F_0 - t_1 r_1$ , 检查收敛性, 若  $y$  对  $t_1$  回归方程已达到满意的精度, 则进行下一步; 否则, 令  $E_0 = E_1, F_0 = F_1$ , 回到第(2)步, 对残差矩阵进行新一轮的成分提取和回归分析。

(3) 在第  $h$  步( $h = 2, \dots, m$ ), 方程满足精度要求(可用交叉有效性确定), 这时得到  $m$  个成分  $t_1, t_2, \dots, t_m$ , 实施  $F_0$  在  $t_1, t_2, \dots, t_m$  上的回归, 得:  $\hat{F}_0 = r_1 t_1 + r_2 t_2 + \dots + r_m t_m$ , 由于  $t_1, t_2, \dots, t_m$  均是  $E_0$  的线性组合, 因此,  $\hat{F}_0$  可写成  $E_0$  的线性组合形式, 即:  $\hat{F}_0 = r_1 E_0 w_1^* + \dots + r_m E_0 w_m^*$ , 式中,  $w_h^* = \prod_{j=1}^{h-1} (I - w_j p_j')$ ,  $I$  是单位矩阵。

最后, 就有  $\hat{y}^* = a_1 x_1^* + \dots + a_p x_p^*, x_j^*$  的回归系数为  $a_1 = \sum_{h=1}^m r_h \omega_{h1}^*$ , 式中,  $\omega_{hj}^*$  是  $w_h^*$  的第  $j$  个分量。

(4) 按照标准化的逆过程, 将  $\hat{F}_0(\hat{y}^*)$  的回归方程还原为  $y$  对  $X$  的回归方程。

## 2.2 构建启动水头值模型

### 2.2.1 建立模型

平推式滑坡主要是在水的推动作用下形成的,其启动水头值的大小与滑坡的块度  $V(m^3)$ 、滑带倾角  $\alpha$ 、滑带内摩擦角  $\varphi$  和内聚力  $c$  的取值息息相关,但因为在水的作用下,内聚力急剧降低,忽略不计。在这里,启动水头值  $h_{cr}$  作为因变量,滑坡块度  $V$  (由滑坡跨度  $L$  代替) 和滑带倾角  $\alpha$  以及内摩擦系数  $\tan\varphi$  对平推式滑动的启动水头贡献最大,作为自变量,收集的数据作为样本。由于资料数量的缺陷,收集的数据点不足 (见表 1), 样本数小于 30, 不能采用多重线性回归方法进行分析, 从而选择偏最小二乘法回归分析启动水头值  $h_{cr}$  与滑坡跨度  $L$  和滑带倾角  $\alpha$  以及内摩擦系数  $\tan\varphi$  的关系, 建模步骤如下:

表 1 红层地区平推式滑坡统计

滑坡名称	启动水头值 $h_{cr}/m$	滑坡跨度 $L/m$	滑带倾角 $\alpha/(^\circ)$	内摩擦系数 $\tan\varphi$	数据来源
赖子龙	96.00	600	6	0.316	文献[1]
南阳碛	20.00	570	4	0.288	文献[9]
安乐寺	48.00	810	5	0.303	
太白岩石	60.00	620	2	0.288	
草街子	53.94	500	5	0.303	文献[2]
枇杷坪	75.84	650	6	0.277	
驸马古	59.80	800	3	0.310	

(1) 设启动水头值  $h_{cr}(m)$  为因变量  $y$ , 滑坡跨度  $L(m)$ 、内摩擦系数  $\tan\varphi$ 、滑带倾角  $\alpha(^\circ)$  分别为自变量  $x_1, x_2, x_3$ , 计算采用 SIMCA - P + 软件进行。

(2) 通过计算, 得到启动水头值与 3 个自变量的标准化偏最小二乘回归模型:

$$h_{cr} = 0.5590L + 0.3744\alpha - 0.1707\tan\varphi \quad (1)$$

(3) SIMCA - P + 计算生成的前两个主成分  $t[1]/t[2]$  平面图及  $T^2$  椭圆图及模型拟合参数见图 2 和表 2。

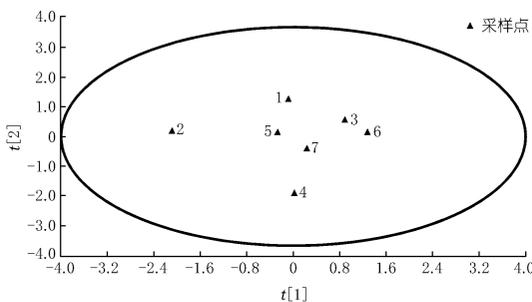


图 2  $t[1]/t[2]$  平面图及  $T^2$  椭圆图

### 2.2.2 模型分析

对上述计算结果分析, 得到启动水头值  $h_{cr}$  与滑坡

跨度  $L(m)$ 、滑面倾角  $\alpha$  正相关, 与内摩擦系数  $\tan\varphi$  负相关。在实际状况下, 块体越大, 内摩擦系数越大, 则要求的启动水头越大, 而滑带倾角  $\alpha$  值增大<sup>[7-8]</sup>, 岩层由缓变陡, 则需要的启动水头变小。上述获得的模型未能充分体现这种相对变化关系, 存在一定的偏差。

表 2 模型拟合参数

Var ID(Primary)	Comp	R2VY	R2VY(cum)	Q2VY	Q2 limit	Q2VY(cum)
启动水头值	1	0.403626	0.403626	-0.36575	0.05	-0.1
	2	0.045617	0.045617	-0.83161	0.05	-0.21

由  $T^2$  椭圆图得到, 收集的样本都非特异点, 但是模型拟合参数中, 模型对启动水头的解释度 (R2VY) 小于 0.5, 模型的解释能力不足, 偏最小二乘法回归模型对启动水头值的构建效果不佳。

回归分析在这里的运用难以获得理想模型, 下面对平推式滑动的力学模型进行分析。

## 3 平推式滑动破坏力学模型及理论启动判据

从平推式滑动的形成机制分析, 滑动块体主要受到的力包括 (图 3): ① 自身的重力  $W$ , ② 块体后缘裂缝中的充水静水压力  $P_w$ , ③ 水沿滑移面的扬压力  $P'_w$ 。

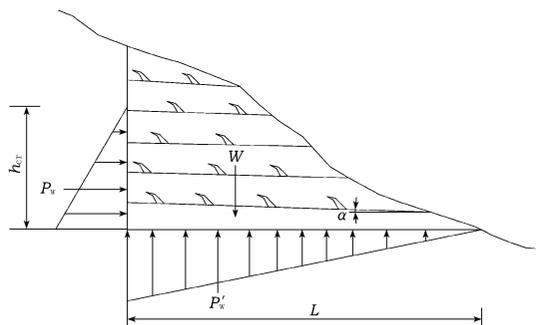


图 3 平推式滑坡的受力分析

图 3 所示的斜坡块体在裂缝中充水的静水压力 ( $P_w$ ) 和水沿滑移面的扬压力 ( $P'_w$ ) 以及块体自重的联合作用下要发生滑动, 必须满足稳定系数小于或等于 1 的条件, 即:

$$\frac{(W\cos\alpha - p_w - p'_w\sin\alpha)\tan\varphi + cL}{W\sin\alpha + p'_w\cos\alpha} \leq 1 \quad (2)$$

由于水岩相互作用使斜坡岩体和软弱结构面的内聚力迅速减小, 因此可忽略上述公式中含有内聚力的一项 ( $cL$ ), 通过进一步推导, 可以得到将后缘拉裂缝 (假定垂直分布) 中充水临界高度 ( $h_{cr}$ ) 作为滑块平推式滑动的启动判据。

通过对大量实例的分析, 张倬元等提出了平推式滑动的力学启动判据<sup>[13]</sup>,

$$h_{cr} = \frac{1}{2\cos\alpha} \left[ L^2 \tan^2\varphi + 8 \frac{M}{\gamma_w} \cos\alpha (\cos\alpha \tan\varphi - \sin\alpha) \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{L}{2\cos\alpha} \tan\varphi \quad (3)$$

式中,  $M$  为滑块单宽重量,  $t/m$ ;  $\alpha$  为滑移面顺滑方向倾角(倾向坡外为正值,反之为负值);  $\varphi$  为滑面摩擦角,不考虑内聚力  $c$ ;  $L$  为滑坡底面沿滑动方向长,  $m$ ;  $\gamma_w$  为水的重力密度,  $t/m^3$ 。

#### 4 基于力学模型的启动水头敏感性实例分析

偏最小二乘法的回归结果达不到精度要求,未能获得满意的效果,故对启动水头的敏感性分析采用王兰生等提出的力学模型启动判据。下面以某拟建核电站拟开挖边坡为例进行分析。

拟建核电厂厂址区位于长江右岸剥蚀残丘地貌部位,地处珍溪场向斜南东翼,岩层呈单斜产出,倾向北西,倾角  $3^\circ \sim 10^\circ$ 。厂房建设将在厂区的东南侧、西南侧开挖,并分别形成长  $1\,660\text{ m}$  和  $580\text{ m}$  的人工挖方边坡。

边坡区内分布地层主要是上覆第四系残坡积粉质黏土、下伏侏罗系上统遂宁组泥岩、砂岩,岩层平缓,为四川盆地中典型的砂泥岩软硬相间的红层结构特征,岩体中陡倾裂隙较为发育,人工边坡形成后,可能在暴雨或者持续强降雨条件下发生顺层滑动,产生平推式滑动模式。

通过对厂址区内的整体分析,决定采用某典型剖面进行计算分析,滑面选取剖面中下伏的一层较薄泥岩作为滑面。

由于无法确定滑体后缘的具体位置,故通过试算进行分析确定。由斜坡坡脚向坡内,将斜坡竖直方向等分,见图 4,间距为  $5\text{ m}$ ,将块体宽度构成一个等差数列  $\{Ln\}$ ,  $Ln = 5n$ ,计算每块岩体滑动时,拟定后缘的充水临界高度  $h_{cr}$ ,并作出拟定后缘的充水临界高度  $h_{cr}$  以及地面到滑面的距离  $d$  与块体宽度  $L$  的关系曲线图。通过对块体后缘的拟定,逐块计算滑动的启动水头值,再比较启动水头值  $h_{cr}$  与地面到滑面的距离  $d$  的大小,若  $h_{cr} > d$ ,则不会产生滑动,若  $h_{cr} < d$ ,则构成块体滑动的条件,存在滑动的可能性。

计算块体滑动的启动水头值  $h_{cr}$ ,启动判据中取滑面倾角  $\alpha$  为  $3^\circ$ ,滑面内摩擦角  $\varphi$  为  $32.2^\circ$ ,水的重力密度  $\gamma_w$  取  $1\text{ t/m}^3$ ,仅滑块宽度  $L$  作为自变量。通过计算,得到  $h_{cr}/d - L$  关系图,见图 5。

由图 5 得到,在开挖面和原始地面的过渡地带启动水头值  $h_{cr}$  小于地面到滑动面的距离  $d$ 。而按照设计开挖后,由于应力重分布、构造或风化裂隙的存在等因

素,边坡在此处(陡缓交接)形成拉裂面的可能性极大,计算得知,若以此处作为后缘,在暴雨或者持续强降雨的情况下,边坡则可能形成平推式失稳破坏。在其他地方,启动水头值高于地面,不满足启动条件。当计算块体后缘超过陡缓交界的位置后,启动水头计算值较明显增大,且地面到滑面间的距离  $d$  与启动水头值  $h_{cr}$  的差值也越来越大,说明块体越大,即块体跨度  $L$  越大,启动条件越苛刻。

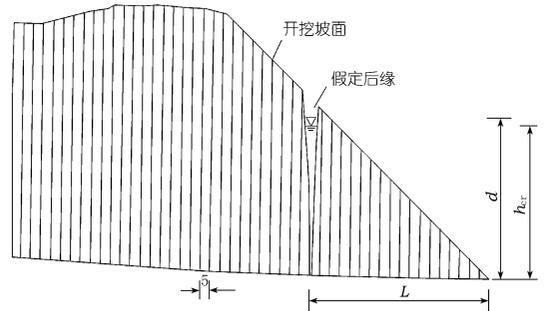


图 4 斜坡剖面平分(单位:m)

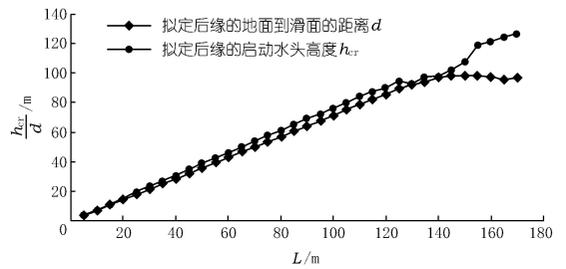


图 5  $h_{cr}/d - L$  关系曲线

对潜在滑坡后缘的预测分析,对工程建设是有指导作用的。在建设过程中,对后缘裂缝形成位置、滑动块体规模等的预判断,十分重要。通过分析,对预判的后缘位置采取一定的监测措施,及时发现变形迹象,或者采取一定的开挖措施,使启动水头值高于地面,启动条件无法满足。

#### 5 结论

(1) 平推式滑坡的形成需要一定的岩体结构特征、触动因素及一定的水力条件,其形成可分为 4 个阶段:雨水入渗、塑性挤出、重力拉裂、充水滑动。

(2) 利用统计方法回归得到的启动判据模型精度不够。偏最小二乘法对启动水头值的解释度 ( $R^2$ ) 小于 0.5,对因变量的解释能力不足,在这里的运用效果不佳,而基于力学分析的启动判据是十分合理的。

(3) 采用基于力学分析的启动判据对滑坡后缘的位置和水头值进行计算,通过先试算拟定后缘的启动水头值  $h_{cr}$ ,再与地面到滑面的距离  $d$  进行比较,若  $h_{cr}$

<  $d$ , 则构成滑动条件。经计算, 开挖后, 在开挖面和原始地形线的过渡地带, 启动水头值低于地面, 预测为潜在滑动后缘的位置。

### 参考文献:

- [1] 王兰生, 李日国, 詹铮. 1981 年四川盆地岩质滑坡的发育特征 [J]. 大自然探索, 1982, (1): 41-45.
- [2] 殷坤龙, 简文星, 汪洋, 等. 三峡库区万州区近水平地层滑坡成因机制与防治工程研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007.
- [3] 孔纪名, 陈自生. 川东 89.7 暴雨过程中的红层滑坡 [C] // 滑坡文集 (9). 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [4] 黄润秋, 赵松江. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程分析和机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 2005, (1): 13-15.
- [5] 张衡, 许模, 马莹, 等. 西南某电站消力塘边坡雾化作用下的稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4153-4157.
- [6] 伍四明, 李日国. 万县滑坡群形成机制的数值模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 1994, (6): 14-17.
- [7] 范宣梅, 许强. 平推式滑坡成因机制研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2008, 27(2): 3753-3759.

- [8] Fan Xuemei, Xu Qiang, Zhang Zhuoyuan, et al. The genetic mechanism of a translational landslide [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2), 231-244.
- [9] 范宣梅. 平推式滑坡成因机制与防治对策研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [10] 王兰生, 张倬元. 斜坡岩体变形的基本地质力学模型 [C] // 阎锡珪, 汪福炳, 黎青宁. 水文地质工程地质论丛 (1). 北京: 地质出版社, 1986.
- [11] 周应化, 邵江, 罗阳明. 近水平红层边坡变形的力学机制分析 [J]. 路基工程, 2006, (1): 6-7.
- [12] 张恒喜, 郭基联. 小样本多元数据分析方法及应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [13] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.

(编辑: 赵凤超)

## Discussion on starting water head in trailing edge of translational landslide

ZHAO Yong, XU Mo, ZHAO Hongmei

(The State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Translational landslide is a special kind of slope instability mode, which is generally characterized by huge size. Its slip surface is of extremely gentle angle or even counter-inclined. Its instability mechanism is in contrast with traditional limit equilibrium theory and its landslide start criterion is the key point of research. Based on analyzing the formation conditions and starting process of a translational landslide, the existing landslide data was analyzed by using partial-least squares regression, and the statistical model of the critical head was obtained. Then, the statistical model was compared with the start criterion model obtained by mechanical analysis. The result showed that mechanical model was better. Finally, the mechanical model was selected and the application was expounded by an engineering example.

**Key words:** translational landslide; least-squares regression; regression analysis; mechanics analysis; start criterion

### · 简讯 ·

## 全国中小河流水文监测系统建设工作会议在京召开

2011 年 8 月 31 日, 水利部在北京召开全国中小河流水文监测系统建设工作会议, 全面部署中小河流水文监测系统建设工作。水利部副部长刘宁出席会议并讲话, 水利部总规划师、规划计划司司长周学文主持会议并作总结讲话。

刘宁指出, 当前和今后一个时期, 我国正处于全面建设小康社会的关键阶段, 是加强水利重点薄弱环节建设、加快民生水利发展的攻坚时期, 是推进传统水利向现代水利、可持续发展水利转变的重要时期, 同时也是加强水文基础设施建设, 推进水文事业更好更快发展的战略机遇期。

刘宁强调, 今年是实施“十二五”规划的开局之年, 也是全国中小河流治理由试点阶段转向大规模实施阶段的第一年。做好今年的各项工作, 事关整个系统建设的顺利实施, 具有十

分重大的意义。① 要尽快组建项目建设管理机构, 负责系统建设管理工作, 确保项目建设的顺利实施。② 要尽快编制印发系统建设管理办法。水利部有关司局要抓紧组织制订《中小河流水文监测系统建设管理办法》, 各建设单位要认真贯彻执行。③ 要加快实施今年安排项目建设工作。各单位要全面完成项目建设实施方案的审批程序, 投资计划下达后, 要加快实施步伐, 早日发挥成效。④ 要抓紧做好后续建设项目前期工作。要在做好今年建设任务实施工作的同时, 尽早开展后续建设项目的前期工作, 抓紧编制建设项目实施方案并完成审批程序。要按照轻重缓急、突出重点的原则, 尽快确定 2012 年建设任务, 争取明年投资计划早下达、早实施。

(长江)