

丹巴滑坡的位移特征

樊晓^{1,2,3}, 乔建平², 田宏岭^{2,3}

(1 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 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;
3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 滑坡位移资料可为分析滑坡运动规律、发展趋势和预测预报提供依据。通过对丹巴滑坡治理过程中滑坡前部、中部和后部的位移监测资料分析, 滑坡位移速度可划分为两个阶段: 位移速度增加阶段和减少阶段。分析了各部位的各个阶段运动特征及其影响因素。对各部位位移速度在增加阶段和减小阶段的速度与时间关系的曲线拟合, 表明滑坡在位移速度增加阶段具有相似的运动特征, 拟合方程都较好地符合指数方程, 而在速度减小阶段受治理工程的影响差别较大, 拟合方程分别为对数、线性和指数方程。以监测数据的初始值和累计最大值, 利用 Logistic 模型对各部位的累计位移进行预测, 预测值与实测值的拟合程度较高, 表明丹巴滑坡在治理过程中的整个累计位移较好地遵循 Logistic 增长过程。从位移监测资料可以看出, 滑坡治理工程有效地控制了滑坡的活动。

关键词: 丹巴滑坡; 位移速度; 累计位移; Logistic 模型

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

滑坡位移是滑坡运动最直接的反映, 滑坡不同部位由于受力状况的差异, 在滑动的过程中其位移也不尽相同。根据对滑坡不同部位位移的监测, 可分析获得滑坡各部位的运动特征; 并且根据统一时段位移的差异, 可分析获得的滑坡体结构特征、运动成因及稳定状况。对在治理工程中的位移资料分析能及时评价治理工程的合理性。

对滑坡位移的研究, 国内外已取得了许多成果, 主要表现在两个方面: 1. 分析滑坡的结构和运动方式。如根据位移监测可分析滑坡的结构和成因, 评价和预测滑坡的稳定状况^[1], 探讨滑坡体的滑动方式及其演变规律^[2], 提高滑坡预测模型精度^[3], 确定滑动面和进行滑坡滑块的划分^[4]。2. 分析滑坡运动速度与时间的关系, 如 Allison and Burnsden 根据滑坡位移资料提出了滑坡位移的 4 种主要类型: 小量、重复位移, 逐步或分阶段滑动, 快速运动和偶然小量的随机运动^[5]。Saito 在 1965 年提出了滑坡发生的时间预测模型^[6]。Petley 等将滑坡加速运动

期间的位移数据绘制在 $\Lambda-t$ 空间模型上 (Λ 表示速度得倒数, t 表示时间)^[7], Saito 指出滑坡在加速运动期间会带来灾难性的破坏, 滑坡发生破坏的时间位于 $\Lambda=Q$ 处。本文根据丹巴滑坡在治理过程中的滑坡位移监测资料, 分析滑坡各部位的位移与时间的关系、滑坡结构及其形成原因, 评价治理工程的合理性。

1 概况

丹巴滑坡位于四川省甘孜藏族自治州丹巴县城建设街后山(图 1), 地貌上属于青藏高原东缘, 四川西部高山高原区的大雪山区。该区域在青藏高原晚期强烈抬升及冰川活动等内外营力共同作用下, 形成了沟谷深切的高山峡谷地貌形态。研究区域地质条件特殊, 具有典型的中、深变质岩系和强烈的构造形变体。基岩为志留系茂县群片岩、黑云母变粒岩, 属于坚硬和半坚硬岩组; 松散堆积物为第四系全新

收稿日期 (Received date): 2006-06-28; 改回日期 (Accepted): 2006-12-29.

基金项目 (Foundation item): 科技部国际科技合作重点项目 (2004DFB01100) 资助 (Supported by the important item of the International Science and Technology Cooperation of Science and Technology of China (2004DFB01100))

作者简介 (Biography): 樊晓 (1974-), 男 (汉族), 四川双流人, 博士研究生, 从事边坡工程、滑坡预测预报及危险度评价研究。[Fan Xiaoyi (1974-), male Ph. D candidate, research direction: slope engineering and landslide hazard assessment. E-mail: xyfan1003@yahoo.com.cn]

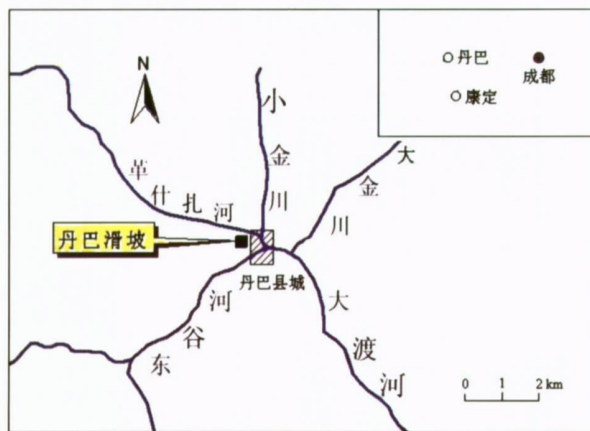


图 1 丹巴滑坡位置图

Fig 1 Sites of Danba landslide

统的古崩塌、滑坡形成的堆积层, 其中块石成分占 60% 以上。

丹巴滑坡从 2002- 08 开始有明显变形迹象, 变形面积约 0.09 km^2 , 体积 $230 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。从 2005- 01- 05 出现变形加速, 02- 03 位移量 $6 \sim 8 \text{ mm/d}$, 02- 21 发生大面积山体滑动, 上百吨沙石滑下, 冲向县城街道, 20 余间居民房被冲垮, 街道被堵断, 部分设施严重受损。03- 08 主滑面位移量达到 18.53 mm/d , 03- 09 出现了两次小规模崩塌, 体积均 $< 100 \text{ m}^3$ 。03- 14 出现了规模比前两次较大的崩塌, 滑坡位移进一步加速, 当日下午 2 10~ 5 00 发

生了间断性崩塌现象, 塌方量约 600 m^3 , 夹杂石头最重者的重量 $> 10 \text{ t}$ 。

2 滑坡位移

丹巴滑坡位移数据是由四川省地质工程勘察院提供的从 2005- 01- 23 ~ 04- 12 的监测数据。本文选取了滑坡主滑方向前部、中部和后部的位移资料, 其监测点位置见图 2。图 3 显示了监测点的位移速度随时间的变化关系。滑坡前部和中部在同一时间发生滑动, 后部滑动时间滞后 10 d, 表明滑坡整体属于牵引式滑坡。滑坡中部启动的速度大于前部速度, 表明滑坡的中、前部在启动时具有推移式特征。滑坡启动 10 d 后, 在达到滑动最大速度前, 各部位位移的速度基本一致, 并且各部位在达到最大位移速度的时间相同。滑坡中部和前部整体滑动后, 为后部提供了滑动加速的空间, 因此滑坡后部较前部和中部有较大的位移速度。滑坡前部因较先做工程处理措施, 故位移速度在达到最大值后较中部和后部小。而此时坡体的中部和后部产生整体位移。在坡体滑动后期, 由于工程治理措施的开挖, 坡体中部和后部又发生短时期加速滑动。根据各部位位移曲线特征, 将其分为位移增加阶段和减小阶段。

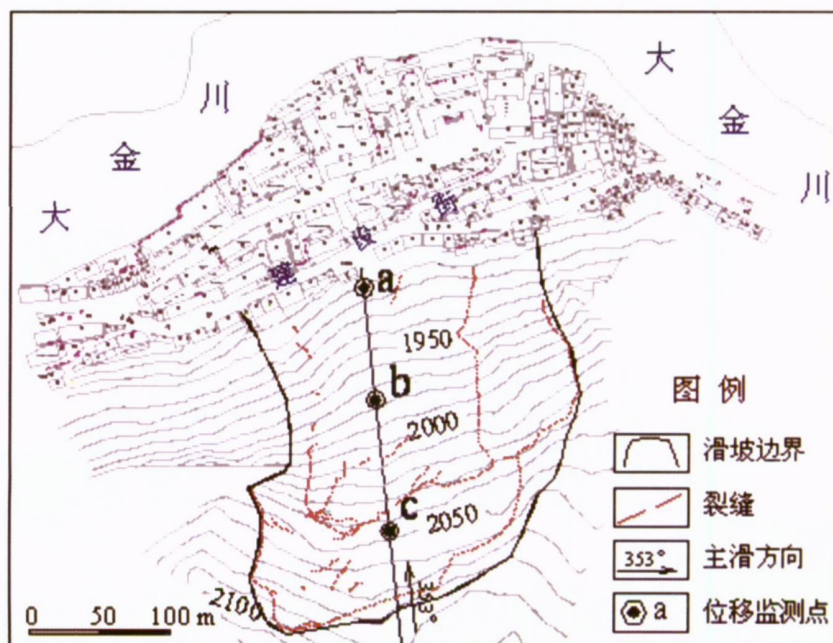


图 2 丹巴滑坡平面图

Fig 2 Plan of Danba landslide

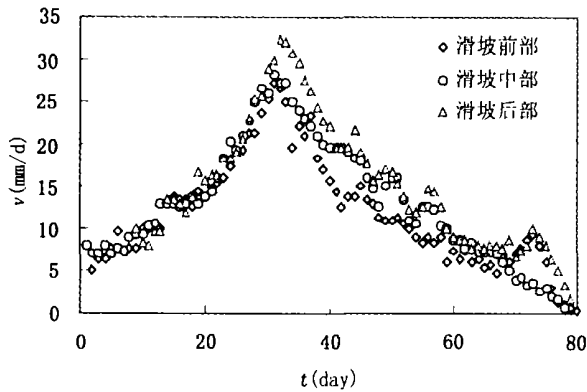


图 3 滑坡各部位位移速度图

Fig 3 Displacement velocity of each section of the landslide

2.1 滑坡位移增加阶段特征

图 4是滑坡各部位在位移增加阶段的位移速度与时间关系图。滑坡前部、中部和后部的速度 - 时间关系都可以运用指数函数 ($v = ae^{bt}$) 进行模拟, 其中 a 、 b 是常数 (表 1, R^2 表示拟合率)。 a 表示滑坡滑动的初始速度, 自滑坡前部到后部逐渐增加; b 表示速度增加的程度, 其值越大, 表明速度增加越快, 并且后部 > 前部 > 中部。但滑坡前部和中部 a 、 b 的值相差较小, 后部 a 、 b 的值较前部和中部偏大。

a 、 b 的大小和差异能准确地说明滑坡滑动的详细特征。滑坡前部首先启动后, 为中部提供一定的滑动空间, 故中部的初速度大于前部。但当中部的滑动距离与前部相同时, 中部会受到前部的阻挡, 因此虽然中部的初速度大于前部, 但其加速的程度小于前部。后部滑动落后前部和中部 10 d 因此后部具有了较大的滑动空间, 其 a 、 b 值都明显的大于前部和中部, 故其滑动的最大速度也大于前部和中部。

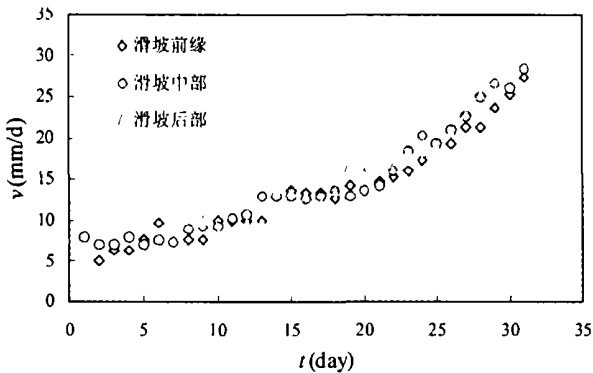


图 4 滑坡各部位在位移增加阶段的速度图

Fig.4 Velocity of each section in the phase of displacement increase

表 1 滑坡各部位在位移增加阶段的模拟方程和参数

Table 1 Simulation function and parameters of each section in the phase of displacement increase

监测点位置	模拟方程	模拟参数		R^2
		a	b	
滑坡前部	$v = ae^{bt}$	5.802	0.0496	0.956
滑坡中部		6.110	0.0473	0.961
滑坡后部		7.997	0.0562	0.955

2.2 滑坡位移减小阶段特征

图 5显示滑坡各部位在位移减小阶段的位移特征。图 5和表 2(R^2 表示拟合率)表明在位移减小阶段, 滑坡各部位曲线特征差别较大, 各自遵循了不同的曲线模型。在进行位移曲线拟合时, 只有滑坡中部曲线的线性拟合相关性较大, 是由于前部和后部在滑动后期有短暂的加速位移。

滑坡前部的位移减小特征较平缓, 主要是在前部做了堆积沙袋压坡脚的治理措施, 增加了抗滑的阻力。但由于在后期进行永久工程治理时, 移除了部分沙袋, 致使前部有短期的加速滑动。中部块体受前部滑体位移速度减小的阻挡, 且防治工程为锚索固定坡体, 对坡体的扰动较小, 其位移曲线较好的遵循了线性减小特征。后部滑块位移速度遵循指数减小规律。其位移速度在达到最大值时, 受到中部块体的顶托, 位移速度加速减小。当减小到一定程度时, 呈现缓慢减小的趋势。但在进行防治工程时, 坡体的开挖致使其也具有一个短暂加速滑动阶段。

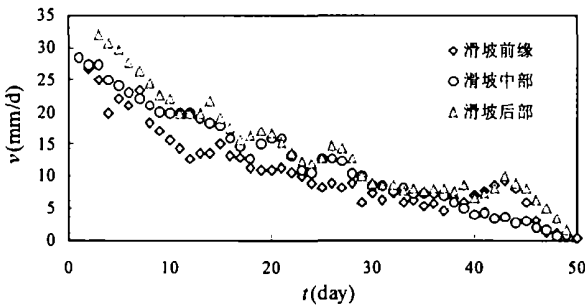


图 5 滑坡各部位位移减小阶段的速度图

Fig 5 Velocity of each section in the phase of displacement decrease

2.3 滑坡各部位累计位移特征

在滑坡位移增加阶段, 滑坡具有有利的滑动空间, 随着位移的增加, 工程措施对滑坡的阻滞作用越来越显著。当位移量较小时, 位移速度的增长率可以看作是常数, 当位移增加到一定数量后, 位移速度

增长率就会随着位移的继续增加而逐渐减小。对丹巴滑坡的位移模拟采用阻滞增长的 Logistic 模型

$$S = \frac{S_m}{1 + \left[\frac{S_m}{S_0} - 1 \right] e^{-rt}}$$

式中 S 为滑坡累计位移量; S_m 为滑坡最大位移量, S_0 为滑坡初始位移量, r 是位移增长率。图 6 显示了滑坡各部位累计位移量实测值与模拟值, 表 3 (R^2 表示拟合率) 为滑坡各部位的参数值。

表 2 滑坡各部位在位移减小阶段的模拟方程和参数

Table 2 Simulation function and parameters of each section in the phase of displacement decrease

监测点位置	模拟方程	模拟参数		R^2
		a	b	
滑坡前部	$v = a \ln t + b$	- 21. 792	97. 506 0	0. 878
滑坡中部	$v = at + b$	- 0. 540	42. 246 0	0. 973
滑坡后部	$v = ae^{bt}$	117. 55	- 0. 040 6	0. 865

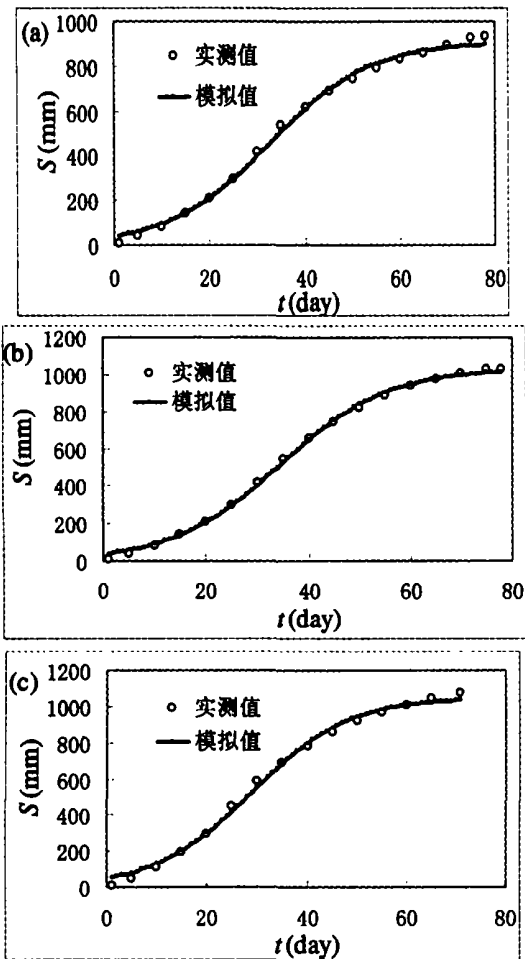


图 6 滑坡各部位累计位移量实测值与模拟值: (a) 滑坡前部; (b) 滑坡中部; (c) 滑坡后部

Fig 6 Values of measurement and simulation of accumulation displacement of each section. (a) fore side (b) middle (c) tail

表 3 滑坡各部位 Logistic 模型的参数值

Table 3 Parameter values of Logistic of each section

滑坡部位	S_m	S_0	r	R^2
a	907	38	0. 096	0. 997
b	1 033	37	0. 095	0. 999
c	1 049	49	0. 104	0. 996

3 结论

1. 丹巴滑坡在发生滑动后, 采取了及时的工程治理措施, 从滑坡位移监测资料显示, 使其得到了有效的控制。从位移监测表明, 滑坡滑动后具有一定的惯性, 会加速滑动一段距离, 在达到最大位移速度后, 位移速度才逐渐减小。并且位移速度减小阶段的时间较增加阶段的时间长。

2. 滑坡位移速度增加阶段的速度与时间遵循指数增加关系, 表明其具有相近的运动方式和运动规律, 各部位之间无相互作用和外界阻挡, 处于各自独立运动阶段; 在位移速度减小阶段, 受到各部位之间的相互阻挡、推移以及工程治理措施的作用, 各部位的速度与时间的关系差别较大。

3. 滑坡各部位累计位移遵循同一的 Logistic 模型。但 Logistic 模型的参数估计值与滑坡滑动的初始阶段的位移量偏差较大, 与 Logistic 模型本身的分布特征有关。在做滑坡位移预测时需要作进一步的修正和处理。累计位移在 10 d 之后预测值与实测值吻合较好。

4. 通过对丹巴滑坡的位移监测, 得到了滑坡各部位的位移曲线特征, 用于分析滑坡运动规律。针对其运动特征采取有效的工程防治措施, 并可利用监测资料掌握工程措施的有效性。运用 Logistic 模型进行滑坡位移量的预测, 可为制定滑坡的危险范围提供参考依据。

参考文献 (References)

[1] Shen Junhui, Sun Baojun, Jin Xiaoguang, et al. Application of displacement monitoring in appraising and forecasting landslide [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32 (5): 813-817. [沈军辉, 孙宝俊, 靳晓光, 等. 位移监测在滑坡评价预测中的应用 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002, 32 (5): 813~817]

[2] Ma a Shuishan, Wang Zhiwang, Zhang Man. Factor analysis on monitoring data of landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1003~1006. [马水山, 王志旺, 张漫.

- 滑坡监测资料的因子分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (7): 1003~1006]
- [3] Wang Shangqing, Deng Xinglin, Yan Xueqing. Monitor analysis and study on forecast models of the important landslides in Geheyan reservoir area of Qingjiang River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11 (2): 89~93 [王尚庆, 邓兴林, 严学清. 清江隔河岩库区重要滑坡的监测分析及预测模型研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11 (2): 89~93]
- [4] Li Tiehan, Luo Peiyun. Monitoring on slope deformation and processing and application of monitored data taking Xintan landslide as example [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1996, 7 (2): 86~92 [李铁汉, 骆培云. 边坡变形监测及其资料的分析运用——以新滩滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7 (2): 86~92]
- [5] Allison, R. J., Brunsden, D. Some mudslide movement patterns [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15 (4): 297~311
- [6] Saito, M. Forecasting the time of occurrence of a slope failure [A]. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (2) [C], 1965, 537~539
- [7] Petley, D. N., Bulmer, M. H. K., Murphy, W. Patterns of movement in rotational and translational landslides [J]. *Geology*, 2002, 30 (8): 719~722

The Displacement Characteristic of Danba Landslide

FAN Xiaoyi^{1,2,3}, QIAO Jianping², TIAN Hongling^{2,3}

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

2 Institute of Mountain Hazard and Environment of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

3 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract The landslide displacement data was analyzed for landslide movement, development and prediction. This paper analyzed the displacement data of the foreside, middle and tail of Danba landslide in the treating engineering. The velocities of the landslide displacements were divided into two phases: the increase phase and decrease phase of the displacement. Using displacement curve, the movement and influence factors of each phase of each section were analyzed. The curve equations had been found between displacement velocity and time in the phases of the increase and decrease of the velocity in each section. These equations indicated that the sections have the identical movement in the increase phase and the equations all accorded with exponential equation. However, because of the engineering, these equations have obvious difference in the decrease phase. The equations of the foreside, middle and tail of the landslide separately accorded with logarithm, linearity and exponential equation. On the basis of original displacement value and accumulative maximum displacement value, there are the better fitting between prediction value and monitoring data when the accumulative displacements of each section are predicted by the Logistic model. It indicated that the accumulative displacements of Danba landslide accorded with Logistic increase process. Moreover, from the monitoring data of displacements, the treating engineering of Danba landslide effectively controls the movement.

Key words Danba landslide; displacement velocity; accumulative displacement; Logistic model