

全球定位系统在峡口滑坡研究中的应用

李爱农, 周万村, 江晓波

(中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要: 全球定位系统用于滑坡变形监测目前在国内外逐渐展开。针对 GPS 用于四川省雅安峡口滑坡监测网的灵敏度进行了分析, 并利用观测结果数据分析了滑坡的状态和滑动趋势。认为, GPS 用于滑坡监测有其特殊性, 能够满足其高精度要求; 在网形设计时, 应考虑灵敏度标准, 有必要将变形分析和优化设计一体化; 但要全面监测滑坡, 最好能将地面监测和地下地质观测结合起来。

关键词: 全球定位系统; 滑坡监测; 灵敏度

中图分类号: P642 22; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)04-0206-03

Application of GPS to Landslides Research in Xiakou

LI A i-nong, ZHOU W an-cun, J IAN G X iao-bo

(Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the recent development of GPS application to landslides monitoring both at home and abroad, this article focuses on the analysis of the sensitivity of GPS monitoring network applied in landslides and its motion and tendency through the collected data in Yaan of Sichuan Province, and it is found that GPS application to landslides monitoring can surely meet its high precision. Furthermore, it is necessary to take sensitivity standards into consideration and put deformation analysis and optimization into a whole in network design. However, to have a full view of landslides monitoring, it would be best if ground monitoring can be correlated with underground geological survey.

Key words: GPS; landslides monitoring; sensitivity

1 前 言

“雅安峡口滑坡防治”项目是由联合国减灾署规划, 中国 - 瑞士国家级合作项目的山地灾害防治项目。GPS 观测的滑坡处于四川省雅安市陇西河左岸的峡口地区, 位于东经 103°0′, 北纬 30°1′, 地处河谷和公路上方。长期以来, 滑坡滑动造成的崩塌对交通运输线造成了很大的危害。滑坡体上住有数户人家, 且滑坡体距离峡口乡和雅安市距离很近, 该滑坡体的存在对下游的人民生命财产安全造成极大的威胁。该滑坡发生在一个复活滑坡体上, 复活滑坡体由古滑坡、老滑坡和新滑坡组成。滑坡区域的基岩由白垩系的砂岩、泥岩组成。滑动物质为古滑坡堆积物, 即紫色黏土加碎石块。滑动带位于基岩与堆积层间, 富地下水。

GPS (全球定位系统) 定位技术具有高精度、速度快、全天候、连续、同步、全自动, 且能获得三维坐标等优点, 已被广

泛用于变形监测领域。目前, GPS 用于滑坡监测已经被越来越多地采用。李劲峰 1996 年在国内首次将 GPS 应用于监测岩崩滑坡, 做出了有益的尝试^[1]; 西班牙的 Josep A. Gili 等讨论了 GPS 监测滑坡表面位移的实用性, 介绍了 GPS 在西班牙比利牛斯山脉东部 Vallcebre 滑坡中的应用情况^[2]。但由于滑坡性质不同、观测环境不同, 对 GPS 滑坡监测网的设计是不同的, 有关 GPS 滑坡监测网的网形设计和灵敏度分析却少有报道。

2 GPS 在峡口滑坡监测中的应用

2.1 设备配置

本滑坡监测所用的仪器是瑞士产的两台 WLD GPS300。整套仪器包括接收器、控制器和数据处理软件包 SKI 便携式计算机及若干附件等。为了检测观测质量, 还同时采用了 T2/D11001 (瑞士造) 配合选点观测。GPS 平面定

收稿日期: 2003-05-25

基金项目: 中科院知识创新项目“长江上游地表覆被变化及信息系统”(项目号: KZCXZ-XW-319-01); 中科院成都山地灾害与环境研究所知识创新工程项目(项目号: 200304-01)部分研究成果。

作者简介: 李爱农(1974-), 男, 硕士, 毕业于西南交通大学摄影测量与遥感专业, 现在中科院成都山地所从事遥感 GIS 和 GPS 应用研究。

位观测精度中误差 $\Delta d = \pm 2 \text{ mm}$ 。

2 2 滑坡监测的特殊考虑

用 GPS 长期监测滑坡时应注意以下问题:

(1) 所选控制点要能反映周围地区的一般特征, 选择仅显示自身运动的点是不够的;

(2) 应避开树冠、建筑物及其它影响接收卫星的障碍物, 遮挡高度角应小于 10° ; 以保证能接受高度角 15° 以上的全部卫星;

(3) 标记测点时, 用坚固的标志比较合适, 如在岩石上打入钢针, 为了减少仪器的对中误差, 应将天线在观测墩上实现强制对中;

(4) 将滑坡区外的多个观测点列入控制网内应该很方便, 这些点的连续测量, 将反映监测系统 (包括基点稳定性) 的实际可靠性;

(5) 为了使测量结果更合理, 可考虑在不同的时日进行重复观测, 最好用不同的卫星;

(6) 在观测过程中应充分利用有效时间, 观测采样以 10 s 为一历元, 延长观测时间, 每一观测段的观测时间都应在 1 h 以上。

2 3 监测网布设

峡口滑坡监测网的布设如图 1 所示, 是一个自由控制监测网。可分为滑坡体监测网和滑坡体外控制点的检测网。

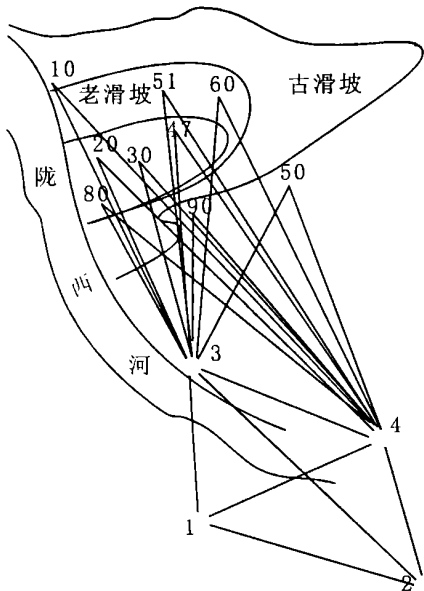


图 1 峡口滑坡 GPS 监测网

在滑坡体上共布设了 9 个观测点 (如图 1), 其中滑坡主滑方向 5 个, 编号 60、47、30、20、80; 蠕动变形体以外 4 个, 编号 10、51、50、90。此外在滑坡范围以外 0.8、1.3 km 处设立了 2 个固定的监测网控制点, 编号 3、4, 地处公路边的基岩上, 交通方便, 但由于受人为影响较大, 我们要定期对其检测, 一般时隔半年检测一次。为了对 3、4 号控制点进行检测, 我们设定了检测控制网, 另外布设了 2 个固定点, 编号为 1、2。其中, 3 号点是一个国家三级水准点, 在 1:5 万地形图上初略量算该

点大地坐标, 作为坐标基准, 建立三维坐标系, dH 为滑坡垂直位移观测方向; dY 为滑坡水平位移观测方向; dX 为滑坡扭动位移观测方向, 和 dY 方向垂直。由于此网的设计基线长度较短 ($< 2 \text{ km}$), 在设计过程中忽略了地球曲率的影响。这样设定坐标系, 有利于全方位观测滑坡的活动变形趋势和动态规律。用静态定位观测法, 以 3 号点为基准, 测算出 4、2、1 点的相对坐标, 作为对整个滑坡监测网的控制系统。

2 4 滑坡监测

自 1996 年 3 月到 1998 年 4 月, 我们每月对峡口滑坡观测一次, 连续两年时间。当中因故缺失 6 次, 共观测有效数据 18 次。对控制网检测了 4 次, 并对控制点作了适当的修订。每次观测大概需要 3 d 时间, 采用快速静态定位法。观测之前要做星历预报, 预报结合实地地势和天气情况选定合适的观测路线和观测时段, 以保证观测精度。每天晚间都要做数据预处理, 做好第二天的补测路线和时段设计。GPS 基线解算和平差都在随机软件包 SKI 中进行, 基线全部合格后再分别在 WGS84 和自定义坐标系统 (Yaan Mercator) 中平差计算, 最后解算出设定坐标系统的点位坐标。

3 峡口滑坡监测网的灵敏度分析

3 1 灵敏度

监测网的灵敏度标准是监测网的一个重要的质量测度, 灵敏度一般用在给定的误差概率 (显著水平 α 和检验功效 β) 下, 通过统计检验所能发现的变形向量的下界值来表示^[3]。它是一个相对的概念, 即对于不同方向的变形向量具有不同的下界值。对于形式向量来说, 其下界值可表示为:

$$\nabla d_0 = \sigma_0 \delta_0 \cdot \hat{g} / \sqrt{g^T Q_{dd}^{-1} g} \quad (1)$$

凡变形量大于 ∇d_0 的变形, 监测网可以监测出来; 凡变形量小于 ∇d_0 的变形, 监测网将发现不了。数值 ∇d_0 反映了监测网发现变形的能力大小, 我们称 ∇d_0 为发现变形 d 的灵敏度, 但这个值与变形的方向 g 有关, 监测网对于不同方向的变形, 其发现能力是有差异的。

由灵敏度的定义可知, 求解灵敏度 g 归结为方向等于何时, ∇d_0 达到极值。若形式向量 g 与 Q_{dd} 最大的特征值 λ_{\max} 所对应的特征向量平行, 则可推出最不利方向的灵敏度为:

$$\nabla d_{\max} = \sigma_0 \delta_0 \sqrt{\lambda_{\max} (Q_{dd})} \cdot \hat{g}_{\max} \quad (2)$$

相应地, 也会得到:

$$\nabla d_{\min} = \sigma_0 \delta_0 (2) \sqrt{\lambda_{\min} (Q_{dd})} \cdot \hat{g}_{\min} \quad (3)$$

上述公式中, Q_{dd} 为位移向量 $d = x_i - x_{i-1}$ 的协因数阵,

对于一定的显著水平和检验功效, σ_0 和 δ_0 均为常数。 ∇d_{\max} 为监测网的主元, 是网最难发现的变形, ∇d_{\min} 称为监测网的么元, 是网最容易发现的变形。在一般情况下, $\lambda_{\max} (Q_{dd})$ 和 $\lambda_{\min} (Q_{dd})$, 即 \hat{g}_{\max} 和 \hat{g}_{\min} 属于实对称矩阵的不同特征值的特

征向量, 因而 \vec{g}_{\max} 与 \vec{g}_{\min} 正交, 所以最不利方向和最有利方向往往也是正交的。

显而易见, 若知道 Q_{dd} , 则 ∇d_0 便可由 (2) (3) 式求得 (λ 由分解 Q_{dd} 而得)。因此, 推求监测网的灵敏度问题转化为如何求得相应的协因数阵。

表 1 GPS 观测点水平位移量统计

GPS 点号	在滑坡上的分布位置	累计位移量 D /mm	月均位移量后 6 个月的月均 $d = D/24$	位移量 /mm
10	外前部	75	4.4	0.6
20	前部	166	9.7	9.9
80	前部	574	33.7	35.2
90	外前部	3525	207.3	2.5
30	中部	101	8.4	8.8
60	后部	68	4.0	4.8
47	后部	120	7.1	8.2
50	后部	35	2.1	2.0
51	后部	139	8.1	8.3

3.2 灵敏度计算与讨论

根据上述公式编程计算该滑坡监测网的灵敏度, 计算中选择显著水平 $\alpha = 0.05$, 检验功效 $\beta = 0.8$, 对于正态分布查表得非中心参数 $\delta_0 = 2.80$, 假设验前中误差 $\sigma_0 = 2.0 \text{ mm}$, 观测值权阵 P 取单位阵。计算得, 最大灵敏度为 14.2 mm , 最小灵敏度为 0.6 mm , 且主元方向基本上垂直于滑坡体预测的滑动方向。最大灵敏度与最小灵敏度之间跨度较大, GPS 监测网的网形结构不会因为变形体的变形而改变。

从灵敏度分析可以得出, 雅安 GPS 监测网布设是合理的, 能够准确监测出滑坡滑动方向的变形。虽然在滑坡扭动方向的监测精度不高, 但监测的主要滑动方向的灵敏度为 0.6 mm , 完全能够满足对本滑坡的监测要求。

4 观测结果分析

观测结果显示, 多数点位移矢量的方位为偏西方向, 即 dY 方向, 大多指向滑坡下滑位移方向, 规律性很强。峡口古滑坡自 1981 年复活后, 大部分堆积体解体, 中心下降, 势能降低, 地形变缓, 基本处于稳定状态。但未被 1981 年复活老滑坡牵动的部分, 自 1995 年开始发生蠕动变形, 新滑坡已在逐渐生成, 地表变形迹象日趋明显。

因松散堆积层滑坡的水平方向位移最能直接反映滑坡的真实性, 所以下文主要讨论峡口滑坡的水平位移活动。表

2 列出了 GPS 自 1996 年 3 月以来, 24 个月共 18 次观测的沿 dY 方向水平位移量。

从表 1 可以看出各 GPS 监测点累计位移量随时间变化的活动性趋势。9 个 GPS 监测点的变化规律均为沿 dY 方向向下发展的趋势, 除了 80、90 号在雨后移动较剧烈外, 其余各点位移一直较缓慢, 从后 6 个月的月均位移量来看滑动有加速的趋势, 说明滑坡体整体处于活动变形状态。根据 GPS 观测的月均位移量, 按照滑坡活动性分类^[4], 新滑坡整体处于蠕动变形阶段。

但其中 10 号观测点位于公路边, 位移量一直较小, 在观测的后半段, 甚至有向上抬升的趋势; 50 号观测点深埋在基岩里, 位移量也很小; 90 号观测点在观测前期发生剧烈活动, 后段基本保持平稳, 这是因为在这期间, 对所处的局部滑坡作了工程治理, 基本处于稳定。

5 结论与讨论

通过上述研究可以得到如下一些结论:

(1) 通过 GPS 观测结果分析可以得出新滑坡处于蠕动变形阶段, 这与地表调查结果基本吻合。按照滑坡活动性分类, 除 90 号观测点的位移量超越蠕动变形位移量外 (实际已滑坡), 其余观测点位移量的变化规律均与实际情况相一致, 说明 GPS 用于滑坡监测的观测结果是可靠的。

(2) 在滑坡监测网的设计中, 要求最佳精度与最佳灵敏度是一致的, 使精度最弱的方向达到最高精度。所以, 可以选择灵敏度作为网的指标。可以使监测网的变形分析与优化设计一体化, 可以在前期观测资料几何分析的同时, 完成下一期监测方案的设计, 并且将前期观测中得来的信息用于随后的观测方案设计中。

(3) 用 GPS 监测滑坡也有一些缺点。因为滑坡往往地处峡谷等地形复杂地段, 从整体上讲观测条件往往较差, 设计中点位选择的自由度较低, 导致误差源较多。可以提前做好详细的星历预报, 选择适当的观测时间段, 适当延长观测时间, 选择强制对中等手段来提高观测精度。

(4) 峡口滑坡 GPS 监测只进行了 2 年时间, 有些观测结果还不能完全肯定为与滑坡相关联的规律性变形。由于滑坡的作用是比较复杂的地质力学过程, 要弄清楚这些变形的相互关系, 必须掌握大量的实测资料, 将地表观测与地下地质观测结合起来, 对该滑坡进行长期监测和更加深入的研究。

参考文献:

- [1] 李劲峰. GPS 应用于监测岩崩滑坡[J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(3): 284-288
- [2] Josep A Gili, Jordi Corominas, Joan Rius. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring[J]. Engineering Geology, 2000, 55: 167-192
- [3] 周世健, 陈永奇, 吴子安. 变形监测网的整体与局部灵敏度标准[J]. 华东地质学院学报, 1996, 19(2): 183-188
- [4] 乔建平. 滑坡减灾理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 122