

三峡库区滑坡监测基准的稳定性分析及结果

黄声享¹ 罗力¹

¹ 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:针对三峡库区近 600 km 水系范围内的滑坡监测问题,利用 2008~2011 年多期 GPS 观测资料,对基准点进行稳定性分析。结果表明,三峡水库高水位蓄水的 3 a 里,库区存在不稳定的基准点,其水平位移在 4 cm 以上,最大点位变化达 79.4 cm。将不稳定基准点的位移方向与现场地理环境进行核查,具有一致性。

关键词:三峡库区;GPS;滑坡监测;基准稳定性

中图法分类号:P258

文献标志码:A

由于三峡水库高水位蓄水以及水位周期性变化的影响,库区地面将发生变形^[1-2],这种变形会对基准点产生影响。此外,库区移民、城镇迁建、开渠筑路等工程活动也可能造成基准点的变动,因此有必要对基准网进行定期复测,并对其稳定性作出判断。GPS 的广泛应用,给库区滑坡监测带来了极大方便。但是如何利用 GPS 观测结果对点位进行稳定性分析,仍是迫切需要解决的问题。目前利用 GPS 研究滑坡监测基准的稳定性,基本沿用了常规方法,如平均间隙法、稳健迭代权法、 t 检验法等^[3]。这些方法应用的前提是,选取局部固定基准计算点位的位移,显然它们只适合于小范围的分析。考虑到滑坡监测基准对变形分析的重要性以及已有方法的局限性,本文针对狭长区域布设的滑坡监测网问题,研究监测基准点的稳定性分析方法。目前该方法已在三峡库区滑坡监测中得到实际应用,经过 3 a 来的工程实践,检验了方法的有效性。

1 GPS 观测

根据三峡库区的实际情况,滑坡监测基准网由 12 个控制点和 235 个基准点组成。其中,235 个基准点是水库三期蓄水阶段(2008~2010 年,水位由 156 m 逐渐抬升至 175 m)对库区 122 个重点滑坡体监测所布设的,一般按每个滑坡体 2 个基准点来考虑;12 个控制点分别分布在湖北省

兴山、秭归、巴东及重庆市巫山、奉节、云阳、开县、万州、丰都、武隆、长寿、江津等地,其覆盖范围介于 $105^{\circ}44''\sim 111^{\circ}39''E$, $28^{\circ}32''\sim 31^{\circ}44''N$ 之间。考虑到测区呈带状分布,迁站距离较远,加上测区多为山地,陆地通行困难,故采用了多基准式观测方案,即将一部分接收机固定在控制点上,进行长时间观测,其余的接收机在基准点间进行流动观测。目前该基准网已进行 4 期观测(2008-10、2010-01、2010-10 和 2011-10),每期按 B 级网观测要求进行实施。此外,为满足数据处理的需要,搜集了邻近区域的 11 个 IGS 跟踪站(WUHN、BJFS、SHAO、KUNM、LAHZ、GUAO、POL2、ULAB、IRKT、DAEJ、TNML)的同步观测数据。三峡库区滑坡监测基准网点与 IGS 跟踪站的点位分布如图 1 所示。

2 分析方法

2.1 控制点的稳定性分析

考虑到库区控制点距离滑坡和库岸相对较远且埋设在稳定的基岩上,故初步将 12 个控制点作为相对稳定点组。控制点在全球框架基准下的水平位移可分为两部分:一部分是控制点随板块和板内块体运动所产生的刚体位移;另一部分是控制点在块体内的变形和局部干扰。通常情况下,前一部分要比后一部分大得多,但它不会引起同一块体上各控制点间相对位置的变化。

收稿日期:2013-01-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274020)。

第一作者:黄声享,教授,博士生导师。主要从事变形监测与灾害预警、卫星导航定位技术应用的教学与科研工作。E-mail: sxhuang@

whu.edu.cn

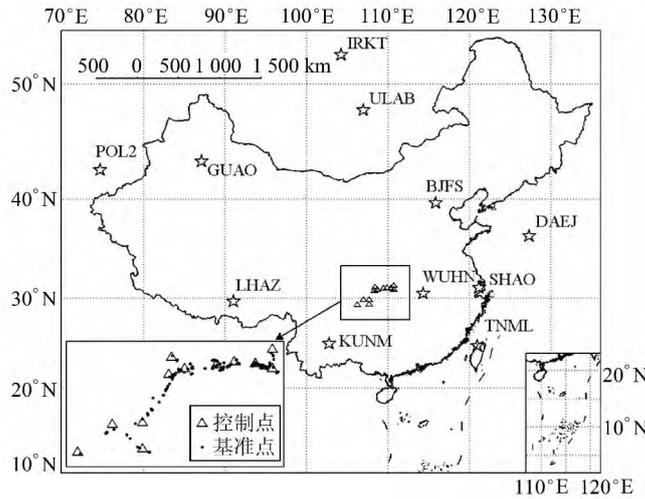


图1 三峡库区滑坡监测基准网点与IGS跟踪站的点位分布图

Fig. 1 Distribution of Landslide Monitoring Datum Points in the Three Gorges Reservoir Area and IGS Stations

考虑到已有多期GPS观测数据,控制点的稳定性分析采用其位移速率。位移速率的计算使用GAMIT/GLOBK软件分三步完成^[4]:①将控制点的数据与邻近区域11个IGS跟踪站的同步观测数据一并进行处理,获得控制点和IGS站以及卫星轨道的每日松弛解;②分析单日解的重复性,剔除异常解,以3d为间隔合并单日松弛解,得到了20多个天解;③选取ITRF2005作为参考框架,以IGS跟踪站为框架点,估计控制点的位移速率。由于武汉站(WUHN)与库区12个控制点同处华南块体,故将武汉站作为检核点。

目前常用的消除块体刚体位移的方法有整体平移法和欧拉矢量法两种^[5]。整体平移法相对简单,块体刚体位移可以取所有点位移的平均值。但实际上构造块体在球面上的运动表现为整体的旋转,对于三峡库区这样的狭长区域而言,若采用整体平移法,经计算分析,测站位移中会残留1~2 mm/a的刚体位移。鉴于此,本文采用欧拉矢量法,构造块体在球面上的运动可用刚体运动模型加以描述^[6]:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ V_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin L & -R \cos L & 0 \\ -R \sin B \cos L & -R \sin B \sin L & R \cos B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, V_n 和 V_e 为测站的水平位移速率; Ω_x 、 Ω_y 和 Ω_z 为欧拉矢量的3个分量; R 为地球平均半径; B 和 L 为测站的大地坐标。

控制点的稳定性可根据式(1)计算得到的水

平位移速率残差来判断,构造标准正态分布统计量^[7]作正态检验:

$$u_i = \frac{V_i}{\sigma_0 \sqrt{Q_{V_i}}} = \frac{V_i}{\sigma_{V_i}} \quad (2)$$

相对稳定点的判断流程见图2。

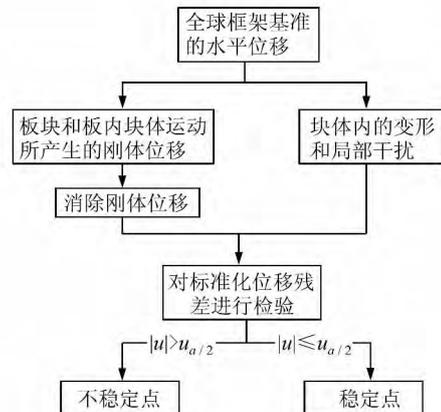


图2 相对稳定点的判断流程

Fig. 2 Flowchart of Relatively Stable Points Determination

2.2 基准点的位移计算

基准点相对于稳定点的位移计算采用固定基准,即稳定点坐标在各期平差处理中保持不变,每期利用稳定点坐标进行约束平差以获取基准点的位移值。平差处理采用椭球面上的三维平差模型,该模型适合平面坐标的解算,同时不受投影变形的限制。为实现各期观测成果的基准统一,对基准误差采用如下方法进行处理^[8-9]:位置基准误差采用基线向量作为观测值予以消除;尺度和方位基准误差通过在平差模型中附加系统参数予以消除;时间演变基准误差通过强约束已知点坐标,

采用迭代平差法予以消除。对于网中任意两点 i, j 间的基线向量,其误差方程为:

$$\begin{bmatrix} V_{\Delta X} \\ V_{\Delta Y} \\ V_{\Delta Z} \end{bmatrix}_{ij} = T_j \begin{bmatrix} \delta \hat{B} \\ \delta \hat{L} \\ \delta \hat{H} \end{bmatrix}_j - T_i \begin{bmatrix} \delta \hat{B} \\ \delta \hat{L} \\ \delta \hat{H} \end{bmatrix}_i + \hat{m} \begin{bmatrix} \Delta X^0 \\ \Delta Y^0 \\ \Delta Z^0 \end{bmatrix}_{ij} + R_j \begin{bmatrix} \hat{\epsilon}_X \\ \hat{\epsilon}_Y \\ \hat{\epsilon}_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X - \Delta X^0 \\ \Delta Y - \Delta Y^0 \\ \Delta Z - \Delta Z^0 \end{bmatrix}_{ij} \quad (3)$$

式中, $V_{\Delta X}, V_{\Delta Y}, V_{\Delta Z}$ 为基线向量的改正数; $\delta \hat{B}, \delta \hat{L}, \delta \hat{H}$ 为坐标改正数; $\Delta X^0, \Delta Y^0, \Delta Z^0$ 为基线向量的近似值; \hat{m} 为尺度参数; $\hat{\epsilon}_X, \hat{\epsilon}_Y, \hat{\epsilon}_Z$ 为绕 X, Y, Z 坐标轴的旋转参数; T 为空间直角坐标与大地坐标微分关系式中的系数阵; R 为旋转参数的系数阵。

因为分析的是水平方向的稳定性,所以每期约束的是稳定点的平面坐标和一个点的大地高,而附加系统参数只取 1 个尺度参数和 1 个绕 Z 轴的旋转参数。理论上讲,采用上述平差模型可以进行整体平差,但考虑到三峡库区滑坡监测涉及多种坐标系,对于不稳定的基准点,需要重新计算其多种形式的坐标,而不同坐标系的公共点(库区控制点)在国家坐标系中的坐标存在兼容性问题^[10],若整体平差,会影响点位坐标的精度,故在这里进行分区处理,以保证每一子区内控制点坐标是兼容的。

2.3 基准点的稳定性分析

基准点的稳定性分析采用置信误差椭圆法。置信误差椭圆元素的计算公式为:

$$\begin{cases} E = k\hat{\sigma}_0 \sqrt{\frac{1}{2}(Q_{drrr} + Q_{dydy} + p)} \\ F = k\hat{\sigma}_0 \sqrt{\frac{1}{2}(Q_{drrr} + Q_{dydy} - p)} \\ p = \sqrt{(Q_{drrr} - Q_{dydy})^2 + 4Q_{drdy}^2} \\ \tan 2\alpha_E = \frac{2Q_{drdy}}{Q_{drrr} - Q_{dydy}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, E 为长半轴; F 为短半轴; α_E 为主轴方向; $\hat{\sigma}_0$ 为两期观测综合单位权中误差; $Q_{drrr}, Q_{dydy}, Q_{drdy}$ 为位协因数阵中元素; k 为比例系数,这里 k 取 3。

3 分析结果

3.1 控制点稳定性分析结果

库区 12 个控制点在 ITRF2005 框架中的水平位移速率如表 1 所示。计算结果采用两种方法进行检验:① 将武汉站的计算结果与其已知值进行比较,两者的差值为 1.3 mm/a(N)、0.6 mm/a(E),它们较为一致;② 将控制点的计算结果与地质模型(NNR-NUVEL1A)结果进行比较,见图 3,控制点的运动趋势与地质学结果基本一致,但它们之间存在一定的系统误差。另外,以长江为界,长江以北 7 个点的平均位移速率为 34.5 mm/a,位移方向为 NE109.2°;长江以南 5 个点的平均位移速率为 34.3 mm/a,位移方向 NE108.4°,反映出三峡库区向东南方向整体运动的趋势。

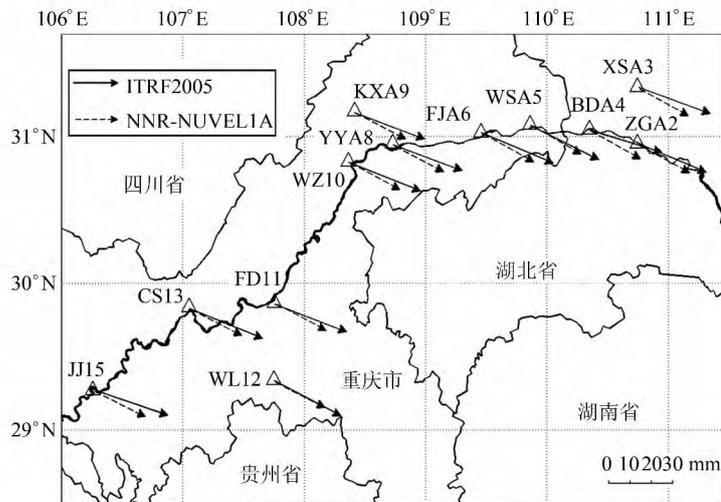


图 3 控制点水平位移速度场
Fig. 3 Horizontal Displacement Velocity Field of Control Points

由式(1)可以得到水平位移速率的残差,结果列于表 1。由表 1 可见,库区 12 个控制点在华南

块体内变形并不显著,其点位在各期观测期间是稳定的。

表1 控制点水平位移速率、拟合值及标准化残差

Tab.1 Horizontal Displacement Rate, Fitted Value and Standardized Residuals of Control points

点名	ITRF2005/mm·a ⁻¹		拟合值/mm·a ⁻¹		标准化残差	
	V _{n1}	V _{e1}	V _{n2}	V _{e2}	dV _n	dV _e
ZGA2	-11.1	31.8	-10.7	32.3	0.5	0.4
XSA3	-10.4	33.4	-10.7	32.1	-0.4	-1.2
BDA4	-8.2	32.8	-10.8	32.3	-2.9	-0.4
WSA5	-13.0	31.5	-10.9	32.3	2.1	0.6
FJA6	-11.9	32.4	-11.0	32.4	1.1	0.0
YYA8	-10.4	31.7	-11.2	32.5	-0.7	0.4
KXA9	-10.6	31.9	-11.3	32.4	-0.8	0.3
WZ10	-11.3	33.1	-11.3	32.6	0.0	-0.3
FD11	-10.9	33.0	-11.5	33.3	-0.4	0.1
WL12	-13.9	30.7	-11.5	33.6	2.1	0.9
CS13	-11.9	33.8	-11.7	33.4	0.2	-0.1
JJ15	-9.9	33.9	-11.9	33.8	-1.2	0.0

注:显著水平 $\alpha=0.001$ 下, $u_{\alpha/2}=3.291$ 。

3.2 基准点稳定性分析结果

将库区滑坡监测基准网划分为秭巴网、巫奉网、万开网和丰长网等4个子网(图4),其中,秭巴网、巫奉网(与秭巴网共用点BDA4)和万开网各包含3个控制点,丰长网包含4个控制点。对每个子网单独进行平差处理。经3期分析,就各子网中不稳定的基准点进行统计,见表2,点位分布见图4。

由表2、图4可知:① 2008~2011年,库区不稳定的基准点有12个,约占总点数的5%;② 不稳定基准点呈“东多西少”分布,在巫山-奉节一带分布比较集中;③ 不稳定基准点的水平位移在4cm以上,最大的点位变化达79.4cm;④ 不稳定基准点的位移方向有明显的一致性;⑤ 对于长期

表2 不稳定的基准点及其累积水平位移

Tab.2 Unstable Reference Points and Cumulative Displacement in Each Period

No.	点名	第一期			第二期			第三期			子网
		位移/cm	方向/(°)	稳定性	位移/cm	方向/(°)	稳定性	位移/cm	方向/(°)	稳定性	
1	DP02	17.1	177.7	×	28.6	179.7	×	41.3	181.6	×	秭巴网
2	RF01	7.4	253.3	×	10.4	251.4	×	14.8	252.6	×	
3	TJP1	6.9	1.5	×	10.1	354.6	×	14.7	352.9	×	
4	PTW1	—	—	√	—	—	√	7.1	323.2	×	巫奉网
5	PTW2	4.1	273.6	×	4.3	266.4	⊗	5.9	278.4	×	
6	HLS2	10.4	83.5	×	14.8	85.0	×	21.6	86.5	×	
7	GHJ2	3.3	167.2	×	6.3	162.7	×	8.9	164.2	×	
8	SYB1	—	—	√	—	—	√	5.7	28.1	×	万开网
9	WCB2	27.5	293.3	×	46.8	290.6	×	79.4	292.0	×	
10	JSB1	—	—	√	—	—	√	15.7	277.3	×	丰长网
11	JZS2	—	—	√	5.4	45.7	×	4.2	47.7	⊗	
12	SPY1	—	—	√	5.7	339.8	×	4.8	337.2	⊗	

注:√表示累积变形经分析是稳定的;×表示累积变形经分析不稳定;⊗表示累积变形经分析不稳定,但本期变形经分析是稳定的。

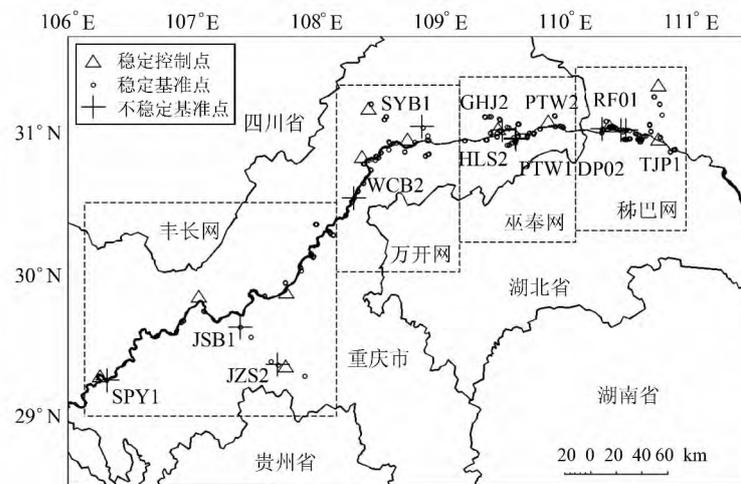


图4 不稳定基准点的点位分布图

Fig.4 Distribution of Unstable Reference Points

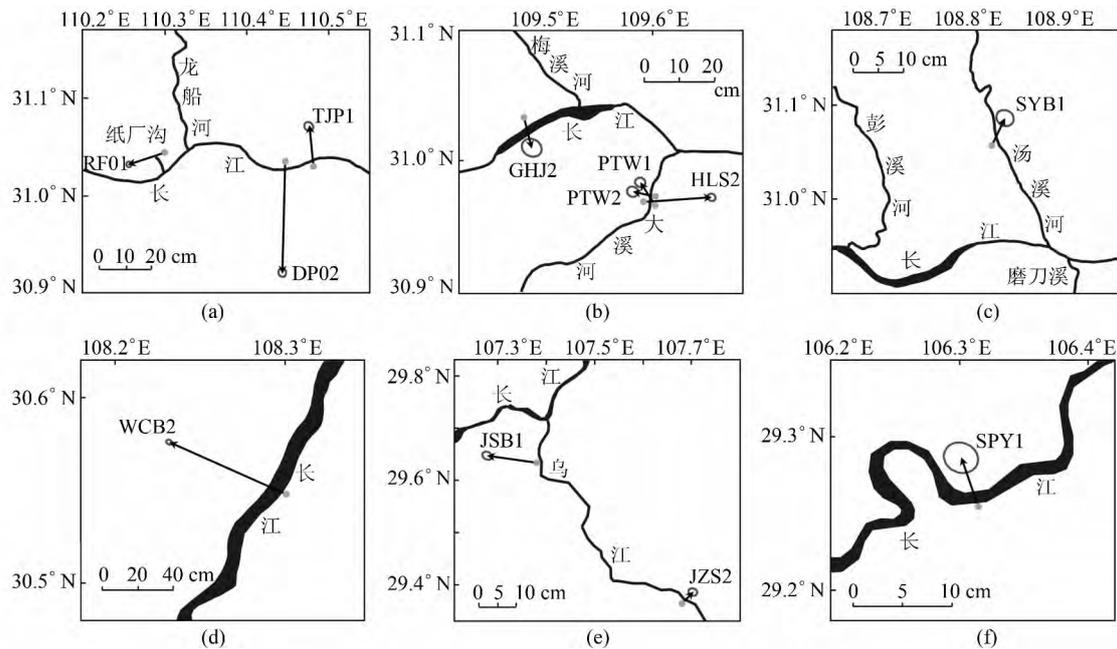


图 5 不稳定基准点的水平位移图像

Fig. 5 Horizontal Displacement Image of Unstable Reference Points

处于不稳定状态的点,其位移随时间大致呈线性变化。

另外,结合现场地理环境,对不稳定基准点的位移方向进行了检查,见图 5。可以看出,除了点 JSB1 之外,其余不稳定基准点的位移方向均指向邻近岸坡的临空方向,这与现场地理环境情况判断的变形趋势是一致的。对于点 JSB1,由于其点位是近期才发生变动的,故应加强监测,并关注该点的变形情况。

4 结 语

三峡水库高水位蓄水的 3 a 里,库区滑坡监测基准网整体上是稳定的,反映出库区地表在现阶段没有发生明显的水平形变。库区存在不稳定的基准点,其水平位移最大达 79.4 cm。若将这些不稳定基准点作为滑坡体变形分析的基准,必然会对滑坡变形演化行为作出错误的判断。因此定期对监测基准进行稳定性分析是库区滑坡监测中不可缺少的环节之一。三峡库区滑坡监测网独特的布设形式,使得监测基准点的稳定性分析有其特殊性。本文方法对狭长区域滑坡监测具有指导作用。

致谢:感谢三峡库区地质灾害防治工作指挥部提供的 GPS 观测数据。

参 考 文 献

[1] Du Ruilin, Qiao Xuejun, Wang Qi, et al. Deforma-

tion in the Three Gorges Reservoir after the First Impoundment Determined by GPS Measurements [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(9): 1 006-1 011(杜瑞林, 乔学军, 王琪, 等. 长江三峡水库蓄水荷载地壳形变—GPS 观测研究[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(9): 1 006-1 011)

[2] Liao Mingsheng, Tang Jing, Wang Teng, et al. Landslide Monitoring with High-Resolution SAR Data in the Three Gorges Region [J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 42(2): 217-229(廖明生, 唐婧, 王腾, 等. 高分率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(2): 217-229)

[3] Huang Shengxiang. Stability Analysis for Deformation Monitoring Network [J]. *Journal of Geomatics*, 2001, (3): 16-9(黄声享. 监测网的稳定性分析 [J]. *测绘信息与工程*, 2001, (3):16-9)

[4] McClusky S, Balassanian S, Barka A, et al. Global Positioning System Constraints on Plate Kinematics and Dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B3): 5 695-5 717

[5] Bo Wanju, Hu Xinkang, Dong Yunhong, et al. On Methods of Crust Deformation Analysis of Medium-Small Area by Using Displacement Velocity Data of GPS Stations [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 20(3): 31-34(薄万举, 胡新康, 董运洪, 等. 用 GPS 位移场进行中小区域变形分析方法探讨 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(3): 31-34)

- [6] Li Yanxing, Huang Cheng, Hu Xinkang, et al. The Rigid and Elastic-Plastic Model of the Blocks in Intro-Plate and Strain Status of Principal Blocks in the Continent of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(6): 565-572(李延兴, 黄城, 胡新康, 等. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. *地震学报*, 2001, 23(6): 565-572)
- [7] Liu Jingnan, Yao Yibin, Shi Chuang. Method for Establishing the Speed Field Model of Crustal Movement in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 331-335(刘经南, 姚宜斌, 施闯. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(4): 331-335)
- [8] Zhang Qin, Huang Guanwen, Ding Xiaoguang, et al. Research and Realization of High-Precision GPS Datum, Considering Plate Movement, Stability and System Errors[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(12): 3 158-3 165(张勤, 黄观文, 丁晓光, 等. 顾及板块运动、稳定性和系统偏差的高精度 GPS 监测基准研究与实现[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3 158-3 165)
- [9] Yang Yuanxi. Crustal Deformation Corrections for the Combined Adjustment of Geodetic Network with Multi-Epoch Observations [J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2003, 23(1): 4-7(杨元喜. 多历元大地网联合平差的地壳形变改正问题[J]. *解放军测绘研究所学报*, 2003, 23(1): 4-7)
- [10] Guo Jiming, Zhou Mingduan, Wen Hongyan, et al. The Application of a Novel Variance Testing Model for Compatibility Analysis of Datum Points in Engineering GPS Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 168-1 171(郭际明, 周命端, 文鸿雁, 等. 一种新的方差检验模型在 GPS 网基准点兼容性分析中的应用[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(10): 1 168-1 171)

Stability Analysis and Results of the Landslide Monitoring Datum in the Three Gorges Reservoir Area

HUANG Shengxiang¹ LUO Li¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Focusing on the limitations of conventional methods, a new method for testing the stability of landslide monitoring network for long and narrow areas was studied. The process was divided into three steps: Firstly, the relatively stability points were identified in the ITRF frame; Secondly, the reference points displacement was calculated in the local reference frame as defined by relatively stable points; Thirdly, a displacement significance test was used to analyze the stability of these reference points. Using GPS observations (2008-2011) of a landslide monitoring network in the Three Gorges reservoir area, the stability of all reference points was tested; finding moved reference points during three years of high water impoundment, with a horizontal displacement of the moved reference points of more than 4 cm, with a maximum of 79.4 cm. The displacement direction of unstable reference points was physically inspected along with the geographical environment, revealing that they were consistent with the results obtained from the proposed testing method.

Key words: the Three Gorges reservoir area; GPS; landslide monitoring; the stability of reference points

First author: HUANG Shengxiang, professor, PhD supervisor, specializes in the research and education in high precision deformation monitoring and GNSS engineering application. E-mail: sxhuang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41274020.