

重力测量在三峡库区形变监测中的作用

蒋福珍¹

(1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路 174 号, 430077)

摘要: 阐述了重力测量在三峡库区形变监测中的作用。

关键词: 重力测量; 形变监测; 水库诱发地震

中图法分类号: P223; P258

三峡库区包括东经 $110^{\circ}40'$ 至 $111^{\circ}20'$, 北纬 $30^{\circ}35'$ 至 $31^{\circ}35'$, 地跨鄂、川、湘、陕四省, 东西宽 60km, 南北长 70km, 面积约 $4\ 200(\text{km})^2$ 。该地区为山地, 平均海拔 500m, 最高山峰 1 500m。在此区域内有四条主要断裂带, 它们是: 仙女山断裂、九湾溪断裂、天阳坪断裂和雾都河断裂。九湾溪断裂带横穿库区, 仙女山断裂带距库岸约 5km, 沿断裂带西侧裂隙、节理发育。新构造期间均显示张性活动; 区域断裂透水性较强, 沿断裂时有微震发生。在这样的活动背景下, 在此建设一座巨型大坝与狭长的水库, 不能不考虑水库诱发地震问题。国内不少学者从不同角度对此问题进行了大量的研究, 认为三峡库区存在发生水库诱发地震的危险性, 但其震级水平不高。一般情况下, 水库初期蓄水到高水平, 蓄水速率较大和高水位持续时间较长或水位迅速降低时容易诱发地震。对三峡水库有可能产生危害的危险区有巴东-楠木园、庙河-香溪、三峡坝区 3 个。

为预防地震发生, 由中国长江三峡工程总公司、中国地震局地震研究所和长江水利委员会综合勘测局联合建立了“长江三峡工程地壳形变监测网, 此网包括 GPS 网、水准网和重力网, 中国科学院测地所在三峡水库蓄水前后用精密的绝对重力仪在库区核心部位测量了重力。

1 高精度重力测量可以用于监测垂直运动

监测高程变化的最好方法是水准测量, 但由

于三峡库首区和库盆区山高且地形复杂, 随着距离的增加, 误差积累严重。水准测量只能提供地表的相对变化, 而不能测量绝对运动, 水准测量结果取决于重力场, 因而用精密水准测量来监测垂直形变难以实施。

GPS 测量虽因其具有全天候、无需通视等优点而被广泛应用, 但利用 GPS 定位确定绝对高程的精度远低于确定平面位置的精度, 误差达几个 cm, 而且由 GPS 得到的是纯几何高程, 不能得到地壳内部物质运动信息。

目前, 重力测量若利用绝对重力仪 FG5 来作高程监测是完全可行的。经过数据验证, FG5 的绝对重力测量精度可达 $(1 \sim 2) \times 10^{-8} \text{ms}^{-2}[1]$, 也就是说, 用 FG5 可以监测 0.3 ~ 0.6mm 的高程变化。因此, 利用重力变化可以较准确地预测高程变化的趋势。

为了得到重力变化和高程变化之间的关系, Walsh 和 Rich 采用均匀非自重半空间中弹性形变引起重力变化的模型和虚功原理给出了高程变化 δh 和重力变化 δg 之间关系的解。高锡铭等人研究了均匀非自重讨论弹性形变引起的局部地区重力变化, 其解积分为:

$$\delta g = \alpha_1 \delta h \quad (1)$$

许厚泽、王勇主要讨论了弹性半空间内, 不同形变机制所产生的高程变化和质量再分布所引起的重力变化, 并且给出了各种单一源, 如表面荷载源、干均匀膨胀源、湿均匀膨胀源、岩浆均匀膨胀源、长冲位错源和长走向位错源等引起重力变化和真

重力垂直位移的关系式和它们的比值 α_1 , 其值列于表 1^[2]。

表 1 一些特殊单一源的重力变化及与高程变化的关系

Tab. 1 Relation Between Lever and Gravety Change of Unique Source		
源名	重力变化表达式	$\alpha_1(\mu\text{Gal}\cdot\text{cm}^{-1})$
表面荷载源	$(-2g/a + 4/3\pi G\rho)h$	-2.33
扩容膨胀源	$(-2g/a + \begin{cases} 0 \\ (2\pi G\rho_w) \end{cases})h$	干 -3.086
		湿 -2.802
岩浆膨胀源	$(-2g/a + 2\pi G\rho_m)h$	-1.525
长冲位错源	$(-2g/a + 2\pi G\rho)h$	-1.967
长走向位错源	$(-2g/a)h$	-3.086

注: ρ, ρ_w, ρ_m 分别是地壳、水和地幔的平均密度; g 是平均重力; G 为万有引力常数; a 为地球平均半径。

2 高精度重力测量可以区分地下物质运移和地壳构造变形

根据重复大地测量资料估计高程变化所能引起的重力变化远比所观测到的实际重力变化为小, 如海域地震及唐山地震前后的重力和高程变化情况, 据陈云泰、陈益惠等专家研究认为高程的变化不足以说明在这期间的重力大幅度上升, 因为重力增加了一百至数百 μGal , 它比高程变化引起的重力变化的幅度至少要高几倍至 10 倍。地表质点垂直形变不能解释地震前后重力变化的量级和形态, 说明有一个比高程更为重要的因素在影响着重力的变化。重力变化的原因各地是不同的, 海城、唐山等大地震可能与地壳和上地幔的质量迁移有关。天津地区的重力变化主要是由于抽取地下水造成的。

形变引起的重力变化为:

$$\delta g = - (2g/r) \delta h - \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

式中, g 为形变前的引力加速度; r 为矢径; δh 为高程变化; T 为质量再分配引起的重力位变化。公式第一项为由高程变化引起的重力变化, 第二项为由于地下物质运移引起的重力变化。

设变形局限于连续介质分布域 V 内, 在变形过程中测点 $Q(\xi, \eta, \zeta)$, 经过 Δt 时间后变形到 $Q_1(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$, 见图 1。其重力变化为:

$$\Delta g = g(Q_1, t + \Delta t) - g(Q, t) = \Delta g_d + \Delta g_m \quad (3)$$

其中,

$$\Delta g_d = g(Q_1, t + \Delta t) - g(Q_1, t) \quad (4)$$

$$\Delta g_m = g(Q_1, t) - g(Q, t) \quad (5)$$

而

$$g(Q_1, t) = G \int_V \frac{\rho(x, y, z)(\zeta - z)}{r_1^3} dV \quad (6)$$

$$g(Q_1, t + \Delta t) = G \int_V \frac{\rho(x, y, z)(\zeta_1 - z_1)}{r^3} dV \quad (7)$$

所以

$$\Delta g_d = G \int_V \frac{\rho(x, y, z)(\zeta_1 - z_1)}{r^3} dV - G \int_V \frac{\rho(x, y, z)(\zeta_1 - z)}{r_1^3} dV \quad (8)$$

$$\Delta g_m = G \int_V \frac{\zeta_1 - z}{r_1^3} \rho(x, y, z) dV - G \int_V \frac{\zeta - z}{r_0^3} \rho(x, y, z) dV + g_F \cdot \Delta u \quad (9)$$

式中, Δg_d 为地下物质运移引起的重力变化; Δg_m 为地表变形为主引起的重力变化。则

$$\Delta g = \Delta g_d + \Delta g_m = G \int_V \left[\frac{\zeta_1 - z_1}{r^3} - \frac{\zeta - z}{r_0^3} \right] \rho(x, y, z) dV + (g_F \cdot \Delta u) \quad (10)$$

其中, 由图 1 可见, $r_0 = QP$; $r_1 = Q_1P$; $r = Q_1P_1$; $g_F = -3.086 \mu\text{Gal}/\text{cm}$, 为正常重力垂直梯度; G 为万有引力常数。

$$\zeta_1 = \zeta + \Delta u_z \quad (11)$$

$$z_1 = z + \Delta u_z \quad (12)$$

式中, Δu 为从 Q 到 Q_1 的位移矢量; Δu_z 为垂直位移; $g_F \cdot \Delta u|_Q$ 是域 V 以外介质的影响。其效应相当于地面变形所导致的自由空气校正。

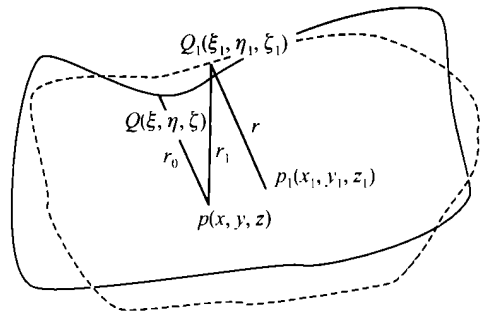


图 1 测点 $Q(\xi, \eta, \zeta)$ 时变前后的位移
Fig. 1 Change of Position $Q(\xi, \eta, \zeta)$ with Time Change

将域 V 分为几个单元, 计算地表 Q 点变形前后的重力变化, 其公式为:

$$\Delta g = (g_F \cdot \Delta u)_Q - G \sum_{i=1}^n \int_{\Delta v_i} \rho(x, y, z) \cdot \left[\frac{z + w + \zeta_1}{r^3} - \frac{z - \zeta}{r_0^3} \right] dV \quad (13)$$

式中, Δv_i 为小单元, $i = 1, 2, \dots, n$; w 为随时间

变化的位移量。

利用三维有限元法可以计算理论模型支持下的重力非潮汐变化, 可以应用实测的重力值和地形变资料, 计算由构造变形引起的重力变化。因此, 利用重力和形变资料相结合, 可以探索构造变形和地壳活动性。这是提高地震预报能力, 抵御或减小地震与其他自然灾害的重要措施之一。

3 重力法求解滑坡体边界

三峡库区地质构造复杂, 节理裂缝发育, 地表岩石破碎, 完整性较差, 水土流失严重, 具有重力侵蚀多发的特点, 加之本区自燕山运动晚期以来, 地壳一直处于间歇性隆起上升, 幅度达 1 700 ~ 2 000 m, 长江不断下切, 为滑坡、泥石流的形成提供了物质基础及位能条件。同时, 随着山区经济的发展、资源和能源的开发、沿江城镇的发展及森林滥砍滥伐、山坡荒地的大量开垦, 近年来, 崩滑泥石流灾害频繁发生。据统计, 在三峡库区沿江 2 km 范围内就有大型滑坡三百余个。

水文气象特征控制了滑坡、泥石流的发生及活动周期, 本区属鄂西、川东暴雨区, 雨量充沛, 年平均降雨量约在 110 ~ 1 500 mm, 暴雨集中于 6 ~ 8 月份。连绵大暴雨带来地表水下渗、地下水活动加剧, 使地表岩土体充分饱水、强度降低, 从而导致大规模滑坡、土滑, 在地形及水文条件具备的地区往往由滑坡演变为泥石流。水库蓄水还会严重改变本区地下水状态, 水系统的变化导致岩土边界、强度、稳定性、地质灾害发生可能性的改变。

不稳定岩土体边界测定方法的研究是预测预防滑坡、泥石流发生的重要内容之一。确定岩土体边界的方法有钻探、微地震及位场方法。

鉴于传统的钻探及微地震方法准确度虽高, 但成本高、周期长, 对地表要求高, 难以大面积开展。位场方法(重力或电)提供了一条简单快速而经济的方法。

重力方法的基本原理是: 地表不稳定岩土体和下部稳定体之间, 通常存在着密度差异, 尤其是松散土壤、风化壳与基岩的密度差通常达 $0.5g/cm^3$ 以上, 这是重力法探测滑面的物质基础。

滑坡体是由滑动的松散堆积物组成, 图 2 中 S_1 为上边界面, S_2 为待确定的下边界面, 其间由堆积物组成。它的密度与围岩一般存在着密度差异 D_1 , 并称之为密度异常, 由此引起了 S_1 面上的重力异常, 可由正演计算得到。另外, 这一异常也可以通过观测得到, 可根据已知的观测反求界面 S_1 。这样正

演、反演多次, 达到与已知观测值相吻合为止, 称为逐次拟合法。计算模型见图 2, 此处采用双层变密度模型, 亦即 D_1 、 D_2 为可变的等效密度异常, D_1 为 S_1 与 S_2 之间的等效密度异常, D_2 为 S_2 至大地水准面以下 2 km 间的等效密度异常。

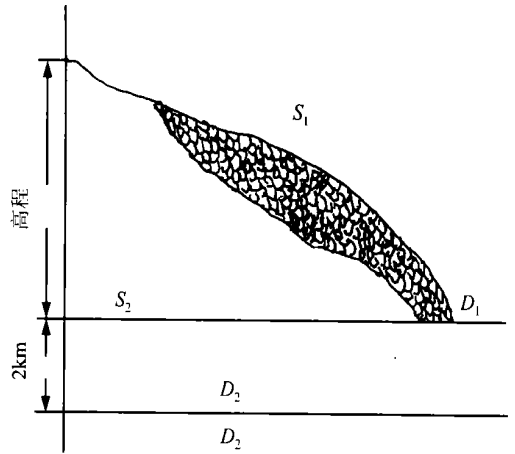


图 2 滑坡体的密度和边界示意图

Fig. 2 Density of Landslip and Its Boundary

4 利用重力计算库区浅层应力场

三峡库区蓄水后, 附加应力场对渗漏条件的改变, 将对库区稳定区问题有重要的影响。目前, 对库水附加应力场影响库区区域稳定性的方式存在不同的看法, 有人认为, 蓄水后的异常孔隙压力触发了丹江水库地震。与此不同, Gough 曾明确指出, 附加应力场直接减小了断层的抗剪强度, 从而诱发了卡里巴尔湖的水库地震。水库一旦蓄水, 附加应力场就成为大地静应力场的一部分。如果其附加应力场达到一定值, 将会改变库区的渗漏条件, 产生孔隙压力, 从而影响库区区域稳定性。利用重力异常计算浅层应力场, 可以作为预测灾害(如地震、滑坡等)发生地的方法之一。

肖强根据弹性力学理论, 推导出用实测重力资料计算地壳静应力场和地幔流应力场公式:

$$\sigma_E = - \frac{g}{4\pi G} g_x \Big|_S \quad (14)$$

$$\sigma_N = - \frac{g}{4\pi G} g_y \Big|_S \quad (15)$$

式中, G 为万有引力常数; g_x, g_y 分别为地幔流应力的北向、东向分量, g_x, g_y 可由实测的布格重力异常经过希尔伯特(Hilbert)变换来获得; g 为重力加速度。在计算过程中采用了一个 μ 因子, 当计算地幔流应力场时, μ 为粘滞系数; 当计算地壳静应力场时, μ 为剪切模量。

岩石圈挠曲是考虑负荷(蓄水)作用下产生的

弹性形变,用重力观测资料研究岩石圈挠曲强度,可以区分挠曲强度小、粘滞度小、应变率大的区域,而这些区域为地壳易破裂区域,即应注意的区域。

综上所述,高精度的水准网、GPS网和重力网同时布设在三峡库首区,对该地区的三维运动图像的描述是互补的,可以综合分析三峡库首区及库盆区的地壳构造在水库蓄水前后的形变特征及运动方向(旋转、扭曲),缺少一种手段都很难说明问题。而且重力的加入不但精化了GPS点的垂向结果,而且对解释其机制也有重要作用,对预测预防水库诱发地震、滑坡等方面提供了很好的佐证。

参 考 文 献

- 1 张为民,王 勇,许厚泽,等.用 FG5 绝对重力仪检测青藏高原拉萨点的隆升.科学通报,2002,45(20): 2 213~2 215
- 2 许厚泽.青藏高原的大地测量研究.武汉:湖北科学技术出版社,2000
- 3 蒋福珍,张赤军,肖 强,等.三峡地区重力剖面的反演与解释.见:长江三峡工程坝区及外围深部构造特征的研究.北京:地震出版社,1994
- 4 邢灿飞,龚凯虹,杜瑞茹.长江三峡工程地壳形变监测网络.大地测量与地球动力学,2003,23(1):114~118
- 5 严尊国,杨福平,周 昕,等.未来长江三峡水库诱发地震的预测技术探讨.大地测量与地球动力学,2003,22(1):101~109
- 6 王清云,张秋文,李 峰.长江三峡工程库首区诱发地震危险性研究.大地测量与地球动力学,2003,23(2):101~106
- 7 高锡铭.局部形变地球表面的重力垂直位移梯度.地壳形变与地震,1987,7(1):9~17
- 8 张众服.三峡地区形变监测与区域地壳稳定性分析.地壳形变与地震,1996,16(4):48~53
- 9 陈益惠,孔祥红,宋胜合.构造变形引起重力非潮汐变化的研究.见:国家地震局科技监测司编.形变·重力·应变专辑.北京:地震出版社,1991
- 10 陈运泰,顾浩鼎,卢造勋.1975年海城地震与1976年唐山地震前后的重力变化.地震学报,1980,2(1):21~31
- 11 李 雄.应用响应函数技术研究岩石圈挠曲.地壳形变与地震,1993,13(1):30~36

作者简介:蒋福珍,研究员。主要从事地球重力场和地球物理方面的研究。获得过多项科技成果奖,已发表文章50余篇。享受国务院特殊津贴。

Role of Gravimetry in Monitoring the Crustal Deformation of Three Gorges Reservoir Area

JIANG Fuzhen¹

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China, 430077)

Abstract: This paper investigates the contribution of the gravimetry to monitoring deformation in the Three Gorges Reservoir area.

Gravity data, especially highly precise gravity data, may remedy the deficiency of GPS and leveling. To describe the 3D image of the crustal movement in this area, these three measurements should be supplementary one another. We can give the deformation characteristics before and after the impoundment by synthesizing these three kinds of data sets. Gravity data not only improves the vertical measurement of GPS but also plays an important role in probing the deformation mechanism and further gives some proofs for monitoring earthquake and landslide.

Key words: gravimetry; monitoring deformation; induced reservoir earthquake

About the author: JIANG Fuzhen, researcher. Her research orientations are gravity and geophysics. She has published over 50 papers.

(责任编辑: 宏远)