

庄映辉, 周坤隆, 洪千盛. 水库渗流条件下探讨钻孔固体潮应变与降雨差异响应[J]. 华南地震, 2018, 38(S1): 57–63. [ZHUANG Yinghui, ZHOU Kunlong, HONG Qiansheng. Study on the Differential Response of Borehole Solid Tide Strain to Rainfall Under the Condition of Reservoir Seepage [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(S1): 57–63]

水库渗流条件下探讨钻孔固体潮应变与降雨差异响应

庄映辉, 周坤隆, 洪千盛

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 在邻近水库无降雨涨水的情况下, 汕头台分量式钻孔应变仪的固体潮幅度存在 NS/NW 向大于 EW/NE 测向的现象; 强降雨后, 钻孔应变的观测值总是存在 EW 向和 NW 向响应明显与水位相关, 而 NS 和 NE 向的应变较弱。对于这种差异响应, 对临近水库的强降雨后加载分析发现, 水库水位在强降雨后迅速上升, 使处于水库西南角的钻孔观测出现加载的方向性。通过对周围岩性和水文地质情况的调查, 认识到水库是周边地下水的主要补给源, 水库的渗流在裂隙侧向的压应力可能是直接影响钻孔应变方向性差异的因素。此外, 钻孔应变的幅度增量与单位降雨量的持续时间反相关, 降雨时间越短, 则应变量越大。

关键词: 钻孔应变; 降雨; 水库渗流; 裂隙

中图分类号: P315.728 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)S1-057-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.S1.009

Study on the Differential Response of Borehole Solid Tide Strain to Rainfall Under the Condition of Reservoir Seepage

ZHUANG Yinghui, ZHOU Kunlong, HONG Qiansheng

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: When no rainfall and swelling in nearby reservoir, the solid tidal amplitude of component type borehole strain meter have the phenomenon that solid tide amplitude in NS/NW direction is greater than that of EW/NE direction; After heavy rain, the observation values of borehole strain in EW and NW direction is obviously related to the water level, but the strain of NS and NE is weak. For this difference response, the paper analyzes the loading and unloading of the adjacent reservoir after the heavy rain, and it is found that the water level of the reservoir rises rapidly after the heavy rain, which makes the borehole strain observation at the southwest of the reservoir appear the direction of loading. After investigating the surrounding lithology and hydrogeology, it is recognized that the reservoir is the main source of recharge for the surrounding groundwater. The seepage pressure at the lateral side of the reservoir may be a direct factor affecting the directional difference of borehole strain. In addition, the increment of the amplitude of the borehole strain is opposite to the duration of the unit rainfall, the shorter the rainfall time, then the greater the strain.

Keywords: Borehole strain; Rainfall; Reservoir seepage; Fracture

收稿日期: 2018-03-28

基金项目: 中国地震局监测、预测、科研三结合项目(CEA-JC3JH-172004)

作者简介: 庄映辉(1965-), 女, 助理工程师, 主要从事地球物理数据观测处理和研究。

E-mail: zhangxin_suxin@163.com.

0 引言

钻孔应变安装于地下几十米深处,能够在一定程度上规避了地面的环境震动扰动,其分辨率达到 10^{-10} 级别。但是在实际观测中,降雨、气压和气温等仍在一定程度上造成记录曲线的扰动。前人研究表明,可以通过开展地面的同步环境观测,使用类比分析等方法识别并去掉类似干扰变化引起的扰动^[1]。比如福建永安台的钻孔应变对于水位就有比较好的一致性,用水位曲线可以相对标定应变变化,对于安装在地下水层附近的钻孔应变仪,刘序俨等^[2-3]为此研究出承压水的应变量分析计算方法。

对于临近钻孔的水库或河流,其不规则涨落会引起观测数据的干扰,尽管前人开展了一定程度的定性研究,但其造成曲线扰动的原理尚不十分清楚。而且因地、因时干扰形态有所不同,很难应用简单的相关方法予以处理。比如,青海德令哈台钻孔应变受黑石山水库的间隙性放水直接影响^[4]。四川姑咱台钻孔应变的长趋势变化与临近的大渡河水位变化密切相关,张凌空和牛安福^[5]的研究认为,大渡河水位的变化影响具有方向性,垂直于河流流向的方位上受影响较大。杨少华等^[6]进行了应变响应的数值模拟,对水位变化引起的长趋势应变开展理论计算和分析。此外,对于陕西西安台体应变与石砭峪水库水位变化的分析表明,钻孔主要受水库突然放水、释放荷载的影响而应变量增大,当水库缓慢涨水时,钻孔应变几乎无响应^[7]。若要使用某种方法对其干扰进行处理以便进行其他方式的数据应用,深入理解产生此

类干扰的原理是必要的。

与内陆地区不同的是,沿海区域的钻孔应变不仅记录了固体潮汐变化,其中还叠加了海潮的影响。对于安装地点的构造条件不同时,观测和数值模拟结果都显示了钻孔应变可能存在应变各向异性。本文关注的汕头台钻孔应变,不仅受到海潮、台风、低气压等自然因素的加载影响,离钻孔口不到 150 m 处还有一座日月坑水库。因此,该台钻孔应变曲线对持续降雨有不同程度的响应,与水库连线处于不同方位的应变具有明显的差异性,即加载应变具有方向性;不仅如此,在无降雨时,其不同方位的固体潮应变量也有较大的差异。由于应变响应具有较多的影响因素,本文基于统计分析和应变计算建立渗流模型,致力于研究这些因素的作用与机制。

1 数据特点及分析

1.1 观测背景

汕头台钻孔井口处于日月坑水库西南角直线距离约 136 m 处,井深 100 m,仪器安装于地下 95 m 附近。水库坝顶高于井口台基 5 m,冬季水位较低,约低于坝顶 10 m 以上,夏季水位较高,排泄增加,但基本上排泄为自然排泄,流量无人工控制。钻孔水位保持在地下 5 m 以上,夏季 3 m 以上,平静状态下井孔内水位与水库水位持平,即夏季时水库水位高于仪器部位 90 m 左右。第一分量即 NS 测项的方位角为 N35°E,其他分量依次顺时针旋转 45°(图 1b)。

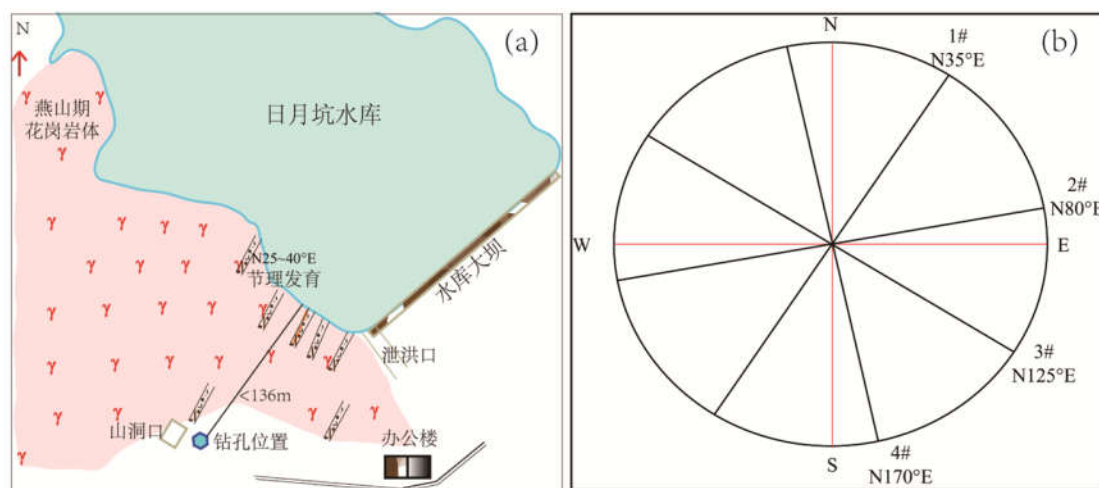


图 1 钻孔与水库相对位置(a)与钻孔参数(b)

Fig.1 Relative position of borehole with reservoir(a)and drilling parameters(b)

钻孔台基为第三纪侵入中粗黑云母花岗岩,第四纪覆盖很薄,深部为燕山期花岗岩(γ)。区域内地下水是第四系松散岩类孔隙水和花岗岩构造裂隙、风化裂隙中的块状岩类裂隙水。地下水的补给、排泄、径流条件基本与地形一致(图 1a)。地下水的补给是大气降水渗入为主,特别是东西部的低山丘陵区,基岩局部裸露,岩石风化裂隙、构造裂隙发育,是大气降水补给地下水的有利部位,基岩地下水沿裂隙径流,低洼处渗,汇集为地表水。松散岩类孔隙水接受降雨、溪流、地表水的补给,顺地势径流向海排泄。

1.2 应变观测与计算方法

根据图 1b,四分量钻孔应变仪的安装参数为 1#: N35°E; 2#: 方位 N80E; 3#: 方位 N125°E;

4#: 方位 N170°E。由其 4 各观测分量可以换算为应变分量:

$$\begin{cases} S_{13}=S_1-S_3 \\ S_{24}=S_2-S_4 \\ S_a=(S_1+S_2+S_3-S_4)/2 \end{cases} \quad (1)$$

由变化得到三个分量 S_1 , S_3 和 S_a , 分别与第一剪应变 γ_1 , 第二剪应变 γ_2 和面应变 ε_a 相对应。整个应变状态是 3 各应变分量叠加的结果。

1.3 自洽检验及相对校正

为了验证四份量钻孔应变的自洽关系,把 1#+3# 与 2#+4# 进行比较,如图 2a,红色比黑色曲线小得多;图 2b 表示在降雨以后,两条曲线之间明显地不满足自洽关系 1#+3#~2#+4#。

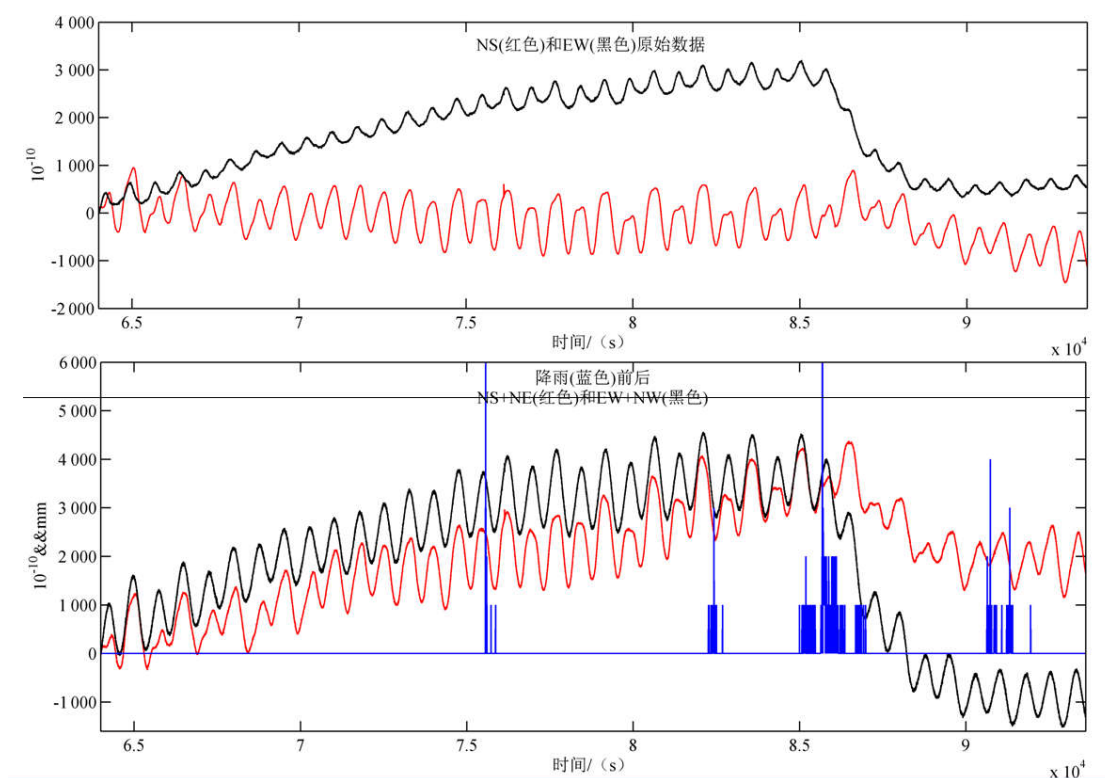


图 2 自洽关系验证

Fig.2 Self-consistent verification of borehole strain

因此,我们使用了邱泽华^[9]提出的相对校正方法对观测数据进行修正,使观测数据可应用于应变分析。校正结果显示,钻孔测项倾斜漂移严重,去倾斜后的校正结果基本满足自洽关系,若不去倾斜的处理,则校正结果很难满足自洽,相关系数也远远偏离于 1 附近,甚至达到-4/0.23 等数值^[9]。

2 钻孔应变与降雨相关性

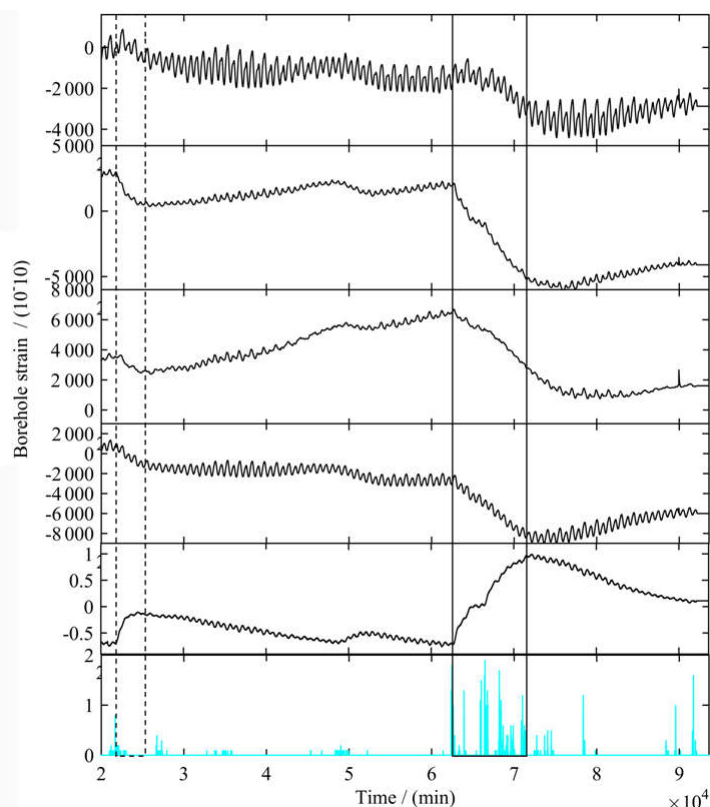
2.1 降雨持续时间与静水位变化的相关性分析

降雨引起地下水渗流,静水位上升,钻孔受压缩应力,应变表现为下降变小。这一过程是容易理解的,也是钻孔应变能够观测正常的检验之一。然而,在实际观测实践中,汕头台钻孔应变

对降雨的响应表现出差异性响应的结果。图 2 为 5 月 11~18 日期间 4 分量钻孔应变曲线, 其中 16 日夜间持续降雨, 降雨量为 120 mm。受该降雨影响, 从图中可见水位上升较多, EW 和 NE 向应变受影响明显, 几乎完全压制了原始固体潮形态, NS 和 NW 向虽然有缓慢下降, 但其原始固体潮形态仍较清晰, 尤其是 NS 向。

把降雨时段的幅度变化量看作降雨的响应,

降雨引起钻孔应变变化量 NS、EW、NE、NW 分别为: 2 924.0, 7 693.1, 4 084.8, 6 578.9。即 1# 最小, 与图 3 中表现一致; 3# 次之, 2# 最大。图中与压制固体潮形态的效果有所区别, 可能原因是钻孔应变观测是相对变化, 计算其绝对变化幅度时, 并不能完全不失真地反映应变响应。因此, 在考虑应变时, 可能需要计算其相对于正常(无降雨等干扰)固体潮的变化幅度。



(图中从上到下依次为 NS, EW, NE, NW, 静水位(m), 降雨量(mm) 分量)

图 3 5 月 11~18 日期间降雨引起的应变差异

Fig.3 Variation of strain caused by rainfall during 11th and 18th May

对于降雨时段的幅度 1#+3#→2#+4#, 即为 2924.0+4084.8→7693+6578.9, 结果为 7 008.8 ≤ 1 4271.9。后者约为前者两倍, 远远难以满足自洽关系。为了认识在降雨前(正常)状态下是否满足自洽关系, 计算了降雨前数天的固体潮变化关系。5 月 10~11 日固体潮变化量: 1#~4# 分别为 1352, 628, 684, 1317; 5 月 20~21 日变化量分别为: 1198, 446, 428, 963, 1# 和 4# 均表现出大于 2 倍 3# 和 2#。与上述降雨引起的变化量不能对应, 但从图 1 可知, 与水库最小距离连线方位角度差小的 1# 和 4# 反而表现不突出, 与最小距离连线接近于垂直的 3# 和 2# 变化非常突出, 完全压制了固体潮形态。实际观测的裂隙方位角约为 N25~40°E, 接近于 1# 的方位角, 实际数据中 1#

的固体潮变化量最大, 其中必然存在某种联系和应变规律(表 1)。

表 1 降雨应变和固体潮应变比较

Table 1 Comparison of rainfall strain and solid tidal strain

应变方位	NS/1#	NE/2#	EW/3#	NW/4#
降雨应变(10^{-10})	2 924	7 693.1	4 084.8	6 578.9
潮应变 1(10^{-10})	1 352	628	684	1 317
潮应变 2(10^{-10})	1 198	446	428	963

2.2 降雨应变

在降雨发生时段, 计算了应变量。计算中对曲线的起点选择一致, 终点处 N13>N24, 但差距一般不超过 1 000 各单位(图 4)。这里必须注意一个现象, 即无降雨时, 固体潮变化量是不均匀的,

即与水库连线方位较近的两个分量固体潮较大,其它二分量较小(参考图3)。而在降雨发生后,应变量与平时反差较大,3#和2#变化量非常明显地大于其他分量。

由公式(1)可知,S13为第一剪应变,S24为第二剪应变,Sa为面应变。图4a为无降雨时的3个应变分量,第一剪应变和第二剪应变近似为镜

像关系,面应变与第一剪应变相位一致。随时间增加,应变量都表现为沿一个方向漂移,尽管经过相对校正后仍有这种现象出现。但是从图4b的变化情况来看,相对于漂移量来说降雨引起的应变量大得多,从这一点看第一剪应变要比第二剪应变大得多,面应变则与第一剪应变量级相当,趋势相反。

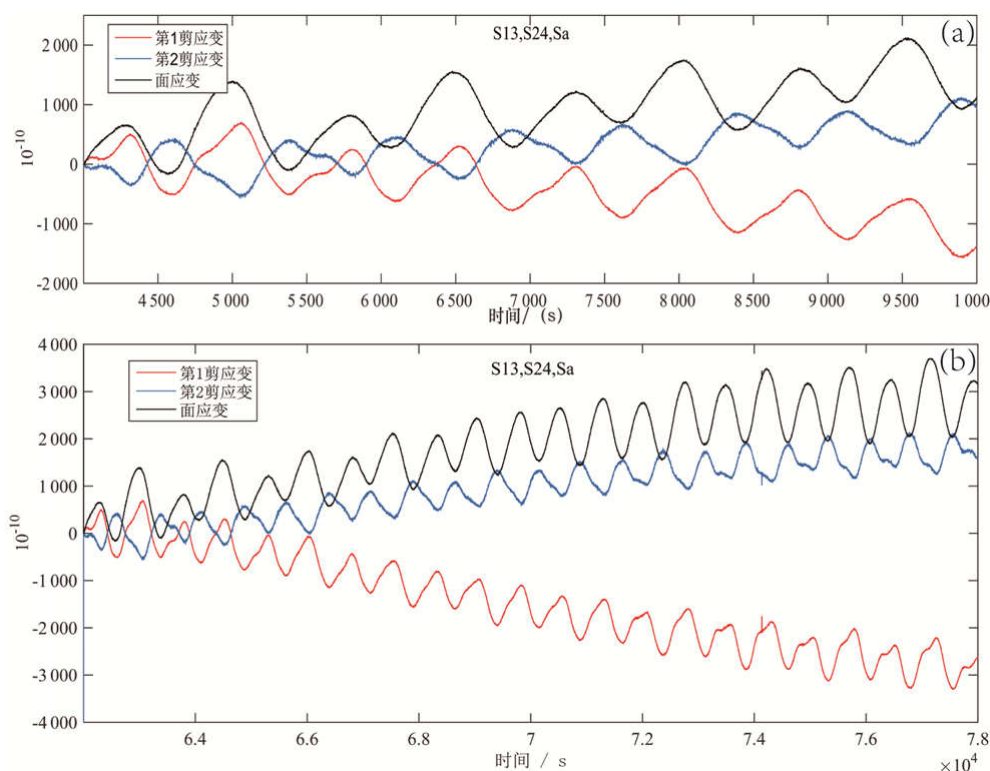


图4 降雨时段的应变计算

Fig.4 Calculation of strain in rainfall period

3 应变响应的差异性渗流模型

应变仪安装在地下95 m左右,与水库秋季水面高差约100 m。对于汕头台这种特殊的水文地质条件下,裂缝发育,可能既有垂向渗流作用,也有水平渗流作用,降雨时后者可能是主要的。另外本区域侵入岩发育,根据钻孔资料,井口到井底并无承压水层发育,因此裂隙的渗流作用是最主要的地下水循环方式。为了解释固体潮汐幅度差异,不考虑流体渗流的情况下,在小于150 m的距离内,岩体一侧受到水库快速涨水(如台风带来的强降雨)的压力,则在钻孔的一侧必然会有响应,这是容易理解的。根据应力应变响应模型,把岩体看作刚体时,水库涨水→岩体受压应力→钻孔一侧体现为压性应变。

张斯奇等^[10]通过对应变固体潮的数值模拟,证实了观测到的潮汐应变各向异性现象很有可能是台站附近断层对固体潮传播影响所造成的;断层弹性参数,台站相对断层的距离和方位都会对应力潮汐因子产生较为显著的影响。因此,我们认为在无强降雨时,孔隙水未完全饱和,来自水库水体一侧的压力较小,流体的流动性相当于软弱带,对该走向固体潮汐有放大作用。相对于井内仪器和水库水体,可以把钻孔围岩当作刚体,那么水库压力的直接传递受体是钻孔腔,由于套管井下部被水泥填实,该应力直接传递到应变分量的应变变化体现出来。这样1#和4#的降雨应变变量应该最大,与水库边界近平行的2~3#较小,但是事实与之相反,降雨时2#/3#应变变量最大。

为了解上述降雨应变与非降雨应变相反的

情况,开展野外地质调查。根据绘制的水库到钻孔井之间的地质构造概要图,并联合前人对于此类岩性的实验结果^[1],初步给出水库水位快速上升所引起的渗流模型。如图 5,水库和钻孔之间的岩体发育方位角为 $N25^{\circ}\sim 40^{\circ}E$ 的裂隙,其方向与 1# 方位最接近,4# 次之,2~3# 较远且趋向于垂直水库西边界。根据模型,模拟了水库在强降雨发生时以及无降雨时的情况:

(1) 水库无强降雨时,水库水面仅仅略高于钻孔水位,或仅与钻孔水位持平;水体压力作用下,仅使较深位置的裂隙含水饱满,上部(接近水位处)的裂隙含水不饱和。这时,裂隙受到固体潮引潮力的作用,周期性开合时,对该方位的固体潮应变具有放大的作用。使在裂隙方位附近记录到的固体潮应变较大,远离该方位的应变较小。

(2) 强降雨时(短时间内降雨量 $>80\text{ mm}$),水库水位高于钻孔水位,水库水位线以下的孔隙都含水饱和;与钻孔之间连通性较好的裂隙充满了饱和水,这种流体是不可压缩性的,从而减弱了区域压应力对于分量应变仪器的作用。

申林方等^[1]使用了单裂隙花岗岩在应力状态下测试渗流应变,有渗流岩样的侧向应变则随时间以稳定的速率发展,这种现象表明了渗透压作用对裂隙面侧向变形的巨大影响。从而在快速涨水的直接压应力作用下,钻孔与水库之间的岩体,其孔隙受到的侧向压力较大。根据二者的方位角关系和宏观裂隙的走向,1# (NS 分量,处于 NE 向)受到的压应力小于其垂直方向(裂隙走向的侧面,参看图 1),故 NE 方位的应变响应较小,与之垂直的 NW 方位上和斜交的 EW 方位上应变响应较大。

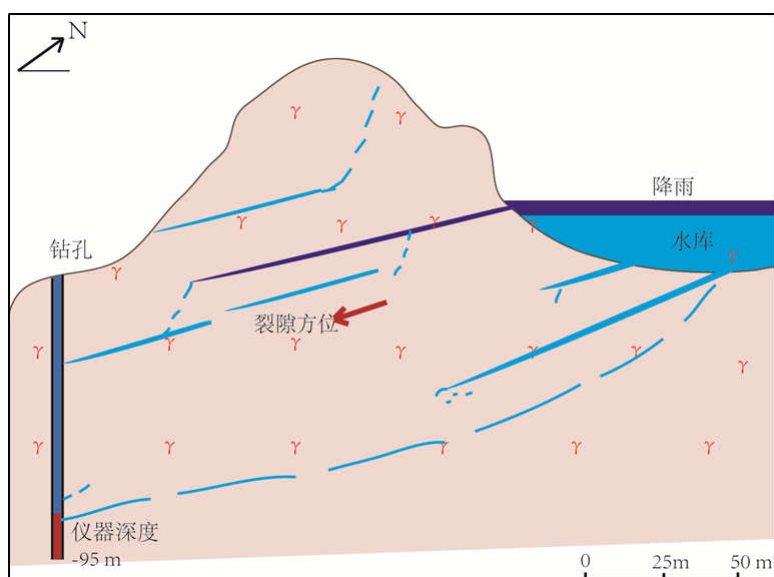


图 5 水库涨水的渗流模型

Fig.5 The seepage model of the reservoir water level rising

4 结语

在研究过程中我们注意到了,与应力主方向夹角较小的测向应变反而较小;与应力主方向接近垂直的测向,其应变较大。即 1# 和 4# 应变量较小,2# 和 3# 应变较大,具有明显的方向性差异,水库在强降雨后水位迅速上升,使处于水库西南角的钻孔观测出现加载的方向性。由于钻孔井为上部套管井,钢套管不透水,压力未达到一定程度时,套管作用为传递应力,使差异应变被四分量钻孔应变仪观测到,观测静水位并不能真

实反映渗流过程,未降雨时的固体潮各向异性与降雨时反相关。本文应变形式与申林方等^[1]的单体花岗岩实验结果类似,因此建立了水库与测点间燕山期花岗岩的渗流模型,这个模型能够在一定程度上解释了降雨和非降雨情形下的应变方向性差异。其基本点在于孔隙连通具有方向优势,以 NE 走向为主,渗流地下水对两侧压缩应力大于前后,是以造成应变的方向性差异。进一步根据水库水位变化和钻孔应变观测数据,可以进一步量化孔隙优势走向和渗流模型。

申林方等^[1]的岩石渗流实验说明了渗流发生

时,其侧向压应变要大于流体前进方向,这一实验结果对于解释本文的降雨差异应变至关重要。在无降水快速加载的时候,可以人为孔隙中的流体与水库连通并保持压力平衡,在固体潮汐的作用下,管流作用下对固体潮的响应起到了放大效应,因此造成了无降雨时,与裂隙方向接近于平行的1#和4#的潮汐响应放大;当降水快速加载时,需要考虑水库涨水导致压力增加,裂隙中流体超饱和,而且平时高于水面的裂隙开始充填,此时孔隙内压力主要来自于快速降雨的加载,它对裂隙两侧的压力远大于其它侧面,这就导致了与裂隙接近于垂直的2#和3#的降雨应变远大于其它方向。

这种现象在钻孔观测离较大水体较近时常常出现,比如:青海德令哈台钻孔应变受黑石山水库水库的间隙性放水直接影响^[4];四川姑咱台钻孔应变的长趋势变化与临近的大渡河水位变化密切相关,且张凌空和牛安福^[9]的研究认为,大渡河水位的变化影响也具有方向性,垂直于河流流向的方位上受影响较大;张斯奇等^[10]提出软弱的断层能够对固体潮变形的传播产生较强的影响,能够被应变仪器观测到,他们对钻孔附近存在断层的数值模拟也给出了类似方向性的结论。此外,杨少华等^[9]对应变响应开展了数值模拟,对水位变化引起的长趋势应变开展理论计算和分析,应变响应在各个方位存在差别。

本文通过对周围岩性和水文地质情况的研究,认识到水库是周边地下水的主要补给源,水库的方向性加载可能是直接影响钻孔应变方向性差异的因素。此外,钻孔应变的幅度增量与单位降雨量的持续时间反相关,降雨时间越短(水库水位增加越快),则应变量越大。当强降雨发生时,尤其是短时强降雨,水库迅速涨水,孔隙压力快速增加,孔隙流体饱和度大大增加,这对于传递水体压力的变化是一个缓冲作用,一定程度地减弱了来自于水库水体的压力,相应地垂直于裂隙方位的降雨应变量反而较小。

参考文献:

- [1] 钟继茂. 分量式钻孔应变仪监测的附加应变场面应变分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(z2): 212-216.
- [2] 刘序严, 郑小菁, 陈莹, 等. 承压井与非承压井水位潮汐效应及其定量分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(1): 35-39.
- [3] 刘序严, 杨锦玲, 王紫燕, 等. 福建省井水位与体应变观测一致性分析[J]. 地震学报, 2017, 39(3): 395-406.
- [4] 文勇, 邱鹏成, 赵燕杰, 等. 德令哈地震台地震前兆测项干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2014(1-2): 177-183.
- [5] 张凌空, 牛安福. 姑咱台钻孔应变观测曲线年变现象成因探讨[J]. 国际地震动态, 2015(9): 104-104.
- [6] 杨少华, 任天翔, 董培育, 等. 姑咱台钻孔应变观测值年变化的数值模拟解释[J]. 地震地质, 2016, 38(4): 1137-1147.
- [7] 陈冬柏, 李媛媛, 罗词建, 等. 石砭峪水库蓄放水对西安台数字化钻孔应变观测的影响研究[J]. 国际地震动态, 2012(6): 206-206.
- [8] 邱泽华, 阙宝祥, 唐磊. 四分量钻孔应变观测资料的换算和使用[J]. 地震, 2009, 29(4): 83-89.
- [9] 陈涛, 董蕾, 唐小勇. 三峡重庆地区钻孔应变资料可靠性检验与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(3): 323-326.
- [10] 张斯奇, 张怀, 石耀霖. 固体潮应变各向异性研究[J]. 地震, 2013, 33(4): 190-195.
- [11] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 单裂隙花岗岩在应力-渗流-化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1379-1388.