

王仁龙,张莉丽,张梅东,等.基于有限差分法的三峡库首区蓄水前后应力场变化与地震活动研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1475-1483.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230207002

WANG Renlong,ZHANG Lili,ZHANG Meidong,et al.Stress field changes and seismic activities before and after the impoundment in the head area of the Three Gorges Reservoir based on the finite-difference method[J].China Earthquake Engineering Journal,2024,46(6):1475-1483.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230207002

基于有限差分法的三峡库首区蓄水前后 应力场变化与地震活动研究

王仁龙^{1,2},张莉丽^{1,3},张梅东¹,秦维秉²,姚运生¹,王允¹,代一鸣¹,胡财雄¹

(1. 防灾科技学院,河北三河065201; 2. 中国长江三峡集团有限公司,北京430010;

3. 河北省地震动力学重点实验室,河北三河065201)

摘要: 水库蓄水前后构造应力场的变化在水库诱发地震研究中具有重要意义。为了探究三峡水库蓄水后应力场变化及蓄水与水库地震的相关性,以三峡水库库首区九畹溪断裂、仙女山断裂和高桥断裂为研究对象,选取自2003年开始蓄水之后72个月的水位变化数据,模拟研究不同蓄水期库水荷载对三峡库首区有效应力及剪应变增量的影响。基于RHINO软件实现真三维地层建模,并应用有限差分软件FLAC^{3D}模拟不同蓄水期库首区有效应力及地下500 m处剪应变增量的变化。从模拟结果可知,库首区的最大主应力和最小主应力都随着水位的上升而增大;与蓄水前相比,蓄水深度为135、145和177 m时,最大主应力增幅分别为5.8%、13.1%和16.8%,最小主应力增幅分别为20.5%、20.5%和32.6%;主应力数值与蓄水位存在正相关性,蓄水位的增大对地震的发生起到了催化和推动作用,提高了地震风险性。研究结果可为三峡水库诱发地震预测提供参考。

关键词: 三峡水库;FLAC^{3D};有效应力;剪应变增量

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1475-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230207002

Stress field changes and seismic activities before and after the impoundment in the head area of the Three Gorges Reservoir based on the finite-difference method

WANG Renlong^{1,2}, ZHANG Lili^{1,3}, ZHANG Meidong¹, QIN Weibing²,
YAO Yunsheng¹, WANG Yun¹, DAI Yiming¹, HU Caixiong¹

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. China Three Gorges Corporation, Beijing 430010, China;

3. Hebei Provincial Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract: The changes in the structural stress field before and after reservoir impoundment are of considerable importance in the study of reservoir-induced seismicity. This study focuses on the Jiuwanxi,

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 大学生创新创业项目(X202211775033); 国家自然科学基金项目(41702264, 42174177); 中国长江三峡集团有限公司项目(0799217); 河北省资源环境灾变机理及风险监控重点实验室开放基金项目(FZ248107)

第一作者简介: 王仁龙(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事水库地震方向的研究。E-mail: 2282113932@qq.com。

通信作者: 张莉丽(1978-), 女, 教授, 博士, 主要从事水库地震、水文地质工程地质方面的教学与研究。E-mail: zhanglili@cidp.edu.cn。

Xiannvshan, and Gaoqiao faults in the head area of the Three Gorges Reservoir to investigate the stress field changes and the correlation between reservoir impoundment and earthquakes in the Three Gorges Reservoir. The water level change over 72 months since the impoundment in 2003 is selected to simulate the effect of reservoir water loads during different impoundment periods on the effective stress and shear strain increment in the study area. The true 3D geological modeling is implemented using the software RHINO, and the changes in the effective stress of the study area and the shear strain increment at a depth of 500 m underground are simulated using the finite-difference software FLAC^{3D}. Simulation results show that the maximum and minimum principal stresses in the head area increase with the rise in water levels. Compared with those before impoundment, the maximum principal stress is increased by 5.8%, 13.1%, and 16.8% when the impoundment depth is 135, 145, and 177 m, respectively, and the minimum principal stress is increased by 20.5%, 20.5%, and 32.6%, respectively. A positive correlation exists between the principal stress value and the water level, and the change in water level plays a catalytic role in the occurrence of earthquakes. This study can provide a reference for earthquake predictions in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Gorges Reservoir; FLAC^{3D}; effective stress; shear strain increment

0 引言

三峡水库自2003年5月19日开始蓄水,至2003年9月停止,期间共记录大小地震2 216次。水位达到125 m时触发了2.1级地震;水位达到135 m时出现了小震群活动;当水位保持在135 m时,出现了不同间隔时间的小震。6月7—15日,地震日频次呈上升趋势,15—24日地震频次呈衰减趋势。显然,地震活动与水库蓄水进程^[1-4]有关,水库

地震频度、强度和库水位综合统计如图1所示。目前世界公认最早的水库地震是发生于1931年的希腊马拉松水库地震^[5],两年后阿尔及利亚又发生富达水库地震。自此,水库地震逐渐被重视起来,在之后的几十年里,国内外学者对此进行了广泛研究,提出了多种研究方法,如地震监测、地质勘探、实验室模拟和遥感技术等。近年来,数值模拟在水库诱发地震的研究中得到了长足发展。20世纪80年代,数

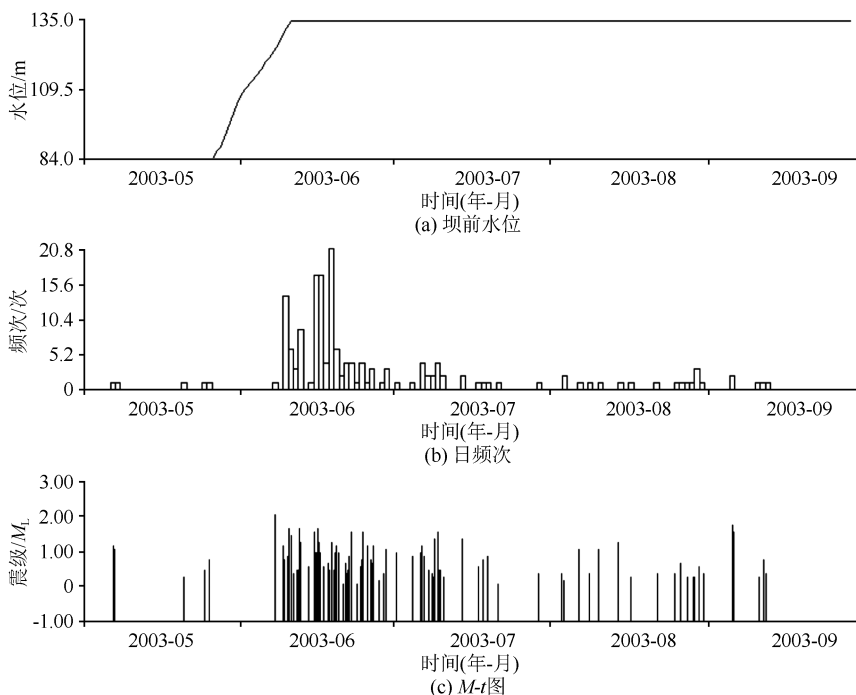


图1 三峡水库水位、地震频度、强度综合图($M > 0$)

Fig.1 Comprehensive map of the water level, earthquake frequency, and earthquake intensity of the Three Gorges Reservoir ($M > 0$)

值模拟^[6]主要采用有限元法和有限差分法模拟水库蓄水对地下应力场和地下水流动的影响,进而推测对地震活动产生影响的可能性;20世纪90年代,数值模拟开始由静态模型向动态模型转变,在考虑水库蓄水的时间序列并分析水位升降对地震活动影响的同时,开始考虑地震对地下流体压力的反馈作用;21世纪初,学者们开始将地质学、地球物理学和水文学等多学科知识融入数值模拟中,并建立更为复杂和真实的地下模型,以提高模拟结果的准确性。随着计算技术的不断发展和高性能计算设备的普及,数值模拟的计算效率和模拟精度得到了大幅提升。近年来,学者们逐渐将不同类型的模型进行耦合^[7],并建立更为复杂的多物理场模型,进一步提高数值模拟的真实性和可靠性。

传统的水库地震模拟主要关注土体的动力响应,忽视了水体和结构体的相互作用。本文基于有限差分法^[8],优化模型网格,建立更加复杂的地质模型;同时,结合地质学和水文学等学科知识,将水土结构相互作用考虑在内,采用多物理场耦合,从多个角度提高模拟的精确性,并从数值解的角度分析蓄水后研究区应力场及剪应变增量的变化,以反映地震与蓄水的相关性。

1 地质背景及相关理论

1.1 地质背景

三峡水库库首区^[9]位于扬子准地台上扬子台褶带上,范围从长江两岸南北向外延20~30 km,东至宜昌市夷陵区三斗坪下游5 km,西至重庆市巫山县境内的巴东上游20 km。研究区分布有多条断裂,分别是九畹溪断裂、仙女山断裂和高桥断裂等。九畹溪断裂带位于黄陵背斜的南侧,总长31 km,由东、西两条平行断裂组成;断层带宽2~5 m,穿切寒武系至下二叠系及下白垩系地层;断裂破碎带主要由糜棱岩、构造岩、构造角砾岩、碎裂岩和断层泥等构成,断层泥结构上相对不均匀,粗砂含量约40%,黏粒含量14%,变形强度较大。仙女山断裂带位于黄陵背斜的西南侧,全长超过80 km;其地形呈右行左阶展布,形成将军山和花桥场两个拉分性质的阶区;断裂带切割长阳复背斜和清江河谷,整体走向为NW340°~350°,倾角为60°~80°;断裂带有明显分段性,从卫星影像上可以看出明显的线性构造,与九畹溪断裂带在老林水电站附近交汇。高桥断裂带位于秭归盆地的西北缘,全长近40 km,切割上古生界至三叠系地层;断裂主体走向为NE50°,倾向SE,倾角50°~80°;该断裂

带具有明显的分段现象,可大致分为北东段和南西段两个部分;高桥断裂带从地貌角度分析,反差明显,形成岭垭、凹槽或沟谷,且沿断裂带有崩积物发育或水系断错。三峡库首区区域地质构造如图2所示。

1.2 相关理论

目前,国内外学者大多采用太沙基有效应力原理来研究库水诱发地震^[10]。根据固体力学原理,当莫尔应力圆位于莫尔强度曲线的右侧时,固体不会产生破裂,即不会产生地震;当莫尔应力圆触碰到莫尔强度曲线时,固体就会产生破裂引发地震。如图3所示的应力圆中,其右侧是安全区,左侧是危险区。假设地层岩石为多孔介质,孔隙中充满了流体,地层岩石受外应力(地应力)和内应力(孔隙压力)的共同作用。地层岩石受到的有效应力就是地应力减去一部分孔隙压力。其中,双重有效应力^[11]中的结构有效应力为:

$$\sigma_{\text{eff}}^s = \sigma - \phi_c p \quad (1)$$

式中: σ_{eff}^s 为结构有效应力(单位:MPa); σ 为应力(单位:MPa); ϕ_c 为触点孔隙度,其数值大于本体孔隙度,但小于1; p 为介质内压(单位:MPa)。

用有效应力绘制的应力圆与用地应力绘制的应力圆,大小相同,位置不同。由于有效应力通常小于地应力,因此有效应力的应力圆会位于地应力的应力圆左侧。

如果向地层注水,即提高孔隙压力,有效应力会减小,如图3所示,应力圆会左移使得地层岩石倾向于破裂,地震发生的危险性增强,这就是注水诱发地震^[12]的基本原理。当然,注水能否诱发地震还要看注水增压的幅度和应力圆的初始位置,如果应力圆的初始位置远离莫尔强度曲线且十分靠右,而注水增压的幅度较小,因而不会诱发地震;如果地层应力圆的初始位置在莫尔强度曲线附近,而注水增压的幅度较大,则会诱发地震。

2 模型建立

根据三峡库首区1:50 000的数字地图,运用RHINO软件建立涵盖地表单元的三维模型,如图4所示。模型厚度取自水库蓄水前的水位至地壳深度12 km处,共分为6层。模型采用六面体^[13]的计算单元,共计247 160个单元。与传统的四面体计算单元相比,六面体计算单元更为规则,拥有更好外观的同时不易发生畸变,且精度更高。此外,使用六面体计算的单元数远小于四面体计算的单元数,它在断裂处使用非结构化网格,从计算的角度来看具有

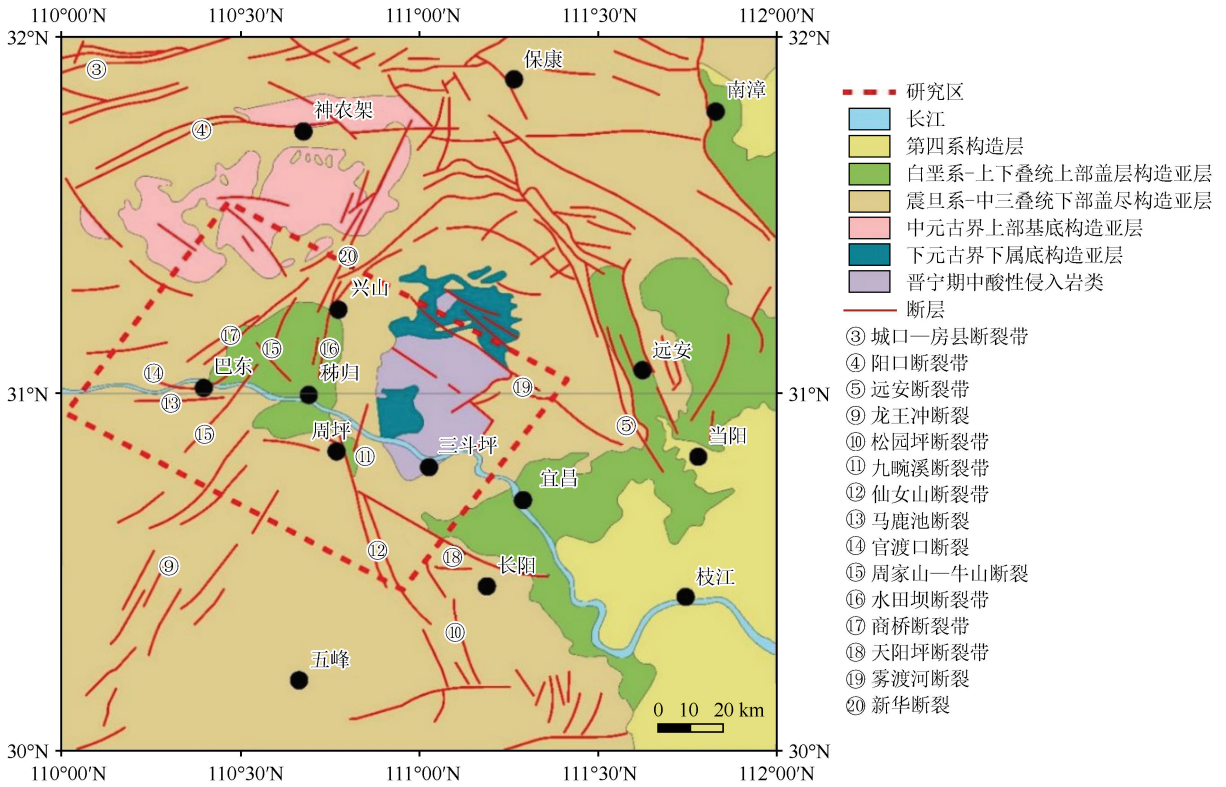


图 2 区域地质构造略图(据长江水利委员会综合勘察局《区域地质构造略图》改编)

Fig.2 Regional geological structure map (Adapted from the *Regional Geological Structure Map of Comprehensive Exploration Bureau of Yangtze River Water Resources Commission*)

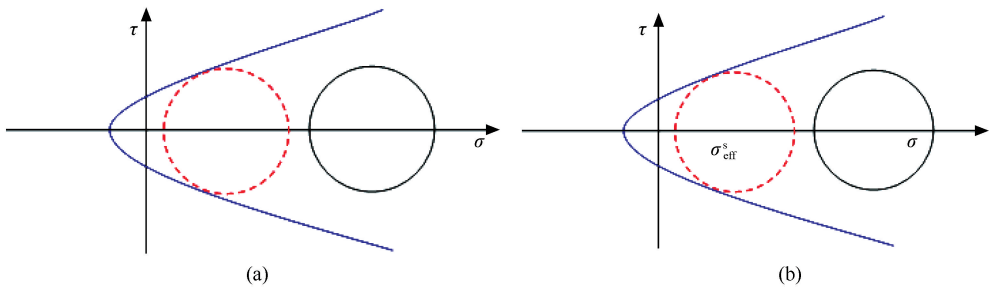


图 3 应力圆图

Fig.3 The stress circle diagram

更大的优势。

3 数值模拟

基于 RHINO 的建模功能,将涵盖高程信息的三维地层数据转化为三维立体模型。使用 Griddle 插件生成体网格,并将网格输入到 FLAC^{3D}中,利用 FLAC^{3D}内置的分组功能赋予模型不同的地层、河流及断层参数。以蓄水后库区重力场、形变场、介质变化及地震活动为约束,模拟分析不同蓄水期(蓄水前、135 m、145 m 和 177 m)库水荷载对九畹溪断裂、仙女山断裂和高桥断裂区域地震活动的影响。通过 FLAC^{3D}软件模拟不同水位时地下 500 m 处剪

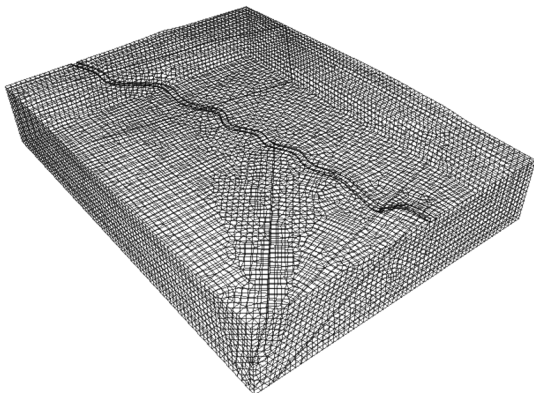


图 4 三峡库首区模型

Fig.4 Model of the head area of the Three Gorges Reservoir

应变增量^[14], 深入探讨研究区典型断裂诱震机制^[15]及地震成因。对模型表面进行分组并设置边界条件, 将四周及底部设置为不透水边界, 在不同蓄水深度下对库区施加相对应的荷载。

当模型达到平衡时, 分析不同水位荷载下主应力与剪应变增量及其分布特点, 探讨蓄水诱发地震^[16]的可能性。

地质分层及岩层力学参数如表 1 所列。值得注意的是 FLAC^{3D} 中的渗透系数 k 与一般土力学中渗

透系数 K 的概念不同, FLAC^{3D} 中 k 的国际单位是 $m^2/(Pa \cdot s)$, 与土力学中渗透系数 $K (cm/s)$ 之间存在如下换算关系:

$$k [m^2/(Pa \cdot s)] = K (cm/s) \times 1.02 \times 10^{-6} \quad (2)$$

因此, 在 FLAC^{3D} 中需要将实验获得的土体渗透系数参数乘以 1.02×10^{-6} , 才能用于计算。

断裂内部的力学参数比较复杂, 所以根据《岩石力学参数手册》^[17], 结合库首区的地质和水文地质条件, 确定了表 2 所列的断裂力学参数。

表 1 地质分层及岩层力学参数

Table 1 Geological stratification and mechanical parameters of strata

岩层编号	岩性	厚度 /m	体积模量 /GPa	切变模量 /GPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	内聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	渗透系数 / $[m^2/(Pa \cdot s)]$	密度 / (kg/m^3)
1	砾石、硬黏土	1 500	8.33×10^{-3}	3.85×10^{-3}	32.00	3.00×10^{-3}	110	1.00×10^{-13}	1 600
2	砂岩、泥岩	1 500	26.80	7.00	27.80	27.20	223	1.00×10^{-15}	2 630
3	粉砂岩、页岩	1 000	15.60	10.80	32.10	34.70	197	1.00×10^{-16}	2 570
4	灰岩	1 000	22.60	11.10	42.00	6.72	134	1.00×10^{-17}	2 680
5	页岩、石英砂岩	2 000	8.80	4.30	14.40	38.40	202	1.00×10^{-18}	2 660
6	花岗岩、石英岩	5 000	43.90	30.20	51.00	55.10	10.34	1.00×10^{-19}	2 690

表 2 断裂力学参数

Table 2 Mechanical parameters of faults

断裂名称	密度 / (kg/m^3)	体积模量 /GPa	切变模量 /GPa	内聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	渗透系数 / $[m^2/(Pa \cdot s)]$
仙女山断裂	1 800	2.5	0.35	0.2	0.01	33	1.00×10^{-4}
九畹溪断裂	1 800	2.5	0.35	0.2	0.01	63	1.00×10^{-4}
高桥断裂	1 800	2.5	0.35	0.2	0.01	22	1.00×10^{-4}

3.1 计算模式选择

在进行流固分析^[18]时, 有两种计算模式: 一种是无渗流模式, 在这种模式下孔隙水压力(孔压)保持不变, 土体单元的屈服判断由有效应力决定; 另外一种一种是渗流模式, 这种模式求解方法较多, 孔隙水压力会随着浸润线的改变而改变。渗流模式和无渗流模式不是互相独立的, 而是可以同时考虑的。本文模拟水位变化对岩土体的影响时, 先使用渗流模式计算水流的变化, 再使用非渗流模式计算岩土体的力学响应。

3.2 模型加载方式

选取 2003 年开始蓄水之后 72 个月的水位变化数据做研究(图 5)。根据不同蓄水期, 分三个阶段分析: 第一阶段为 2003 年 6 月—2006 年 9 月, 水库开始蓄水至 135 m 并保持该水位运行, 此阶段为稳定水位荷载; 第二阶段为 2006 年 9 月—2008 年 9 月, 水位从 145 m 蓄水至 156 m, 每年在高水位运行半年之后, 逐渐下降至 145 m 的低水位, 在 156 m 蓄水末期曾试验性蓄水至 172 m, 为 175 m 试验性蓄水做准备; 第三阶段为 2008 年 9 月 21 日—2020 年 12 月,

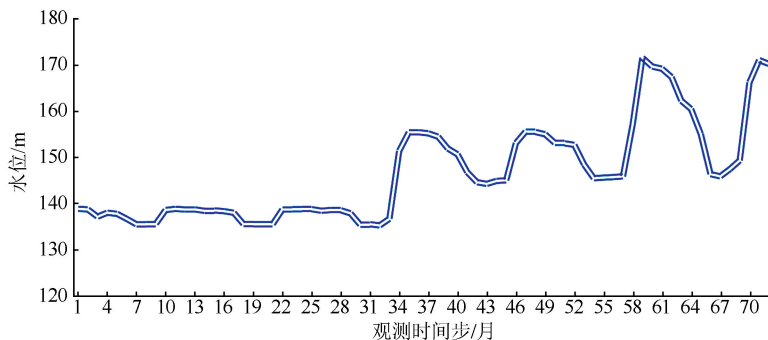


图 5 蓄水后 72 个月内库区的水位变化

Fig.5 Changes of water level in the reservoir area within 72 months after impoundment

可以视作 175 m 试验性蓄水。因此,每年的水位变化过程是从 145 m 的低水位试验性蓄水至接近 175 m 的高水位,在高水位运行半年之后,再将水位下降至 145 m 的循环过程。为了探究三峡水库蓄水水位的最大范围,在 175 m 的基础上再增加 2 m 的蓄水高度。177 m 水位具有一定的研究意义,因此对 177 m 的蓄水情况进行了模拟。

蓄水期时,三峡水库的水位变化波动较大,每年水位落差可达几十米,并且具有周期性和循环性的特点。考虑到水库水位短时间内不会发生突变,所以设置加载方式为静荷载。在静荷载的加载方式下,默认水库水位不变,即荷载稳定。无渗流模式下,在水库上方施加库水的重力荷载,这时需要考虑构造应力场,将水位荷载直接作用于网格上,并通过设定材料参数来考虑水与土体之间的相互作用。在上述基础上设置孔隙度、渗透系数等参数,模拟库水对土体的荷载。

3.3 模拟结果分析

在静荷载的加载方式下,不同蓄水期库首区的最大主应力^[19]如图 6 所示。由图 6 可得,蓄水前库首区的最大主应力在 $-1.208\ 6 \sim -95.038\ \text{MPa}$ 之

间;当蓄水深度为 135 m 时,最大主应力有所增大,为 $-2.232\ 4 \sim -100.58\ \text{MPa}$;当蓄水深度为 145 m 时,最大主应力较 135 m 深度增幅不大,为 $-2.407\ 6 \sim -107.52\ \text{MPa}$;当蓄水深度达到 177 m 时,最大主应力变为 $-3.056\ 5 \sim -111.04\ \text{MPa}$ 之间。压应力的最大值较蓄水前增大了 $16.002\ \text{MPa}$,增幅为 16.8% 。同时,不同蓄水期库首区的最小主应力也会发生变化,如图 7 所示。蓄水前库区的最小主应力范围在 $-4.005\ 2 \sim -263.54\ \text{MPa}$;当蓄水深度为 135 m 时,最小主应力范围为 $-0.430 \sim -317.62\ \text{MPa}$,增大了 $54.08\ \text{MPa}$;在 145 m 水位,最小主应力范围为 $-0.432 \sim -328.64\ \text{MPa}$,增大了 $11.02\ \text{MPa}$;当蓄水深度达到 177 m 时,最小主应力范围为 $-0.478\ 69 \sim -349.57\ \text{MPa}$ 。最小主应力的增幅达到了 $86.01\ \text{MPa}$,增长率为 32.6% ,并且最大主应力及最小主应力的分布遵循从上到下依次增大的规律。这说明蓄水之后,最小主应力绝对值的增幅大于最大主应力,即在蓄水之后区域的剪应力会明显增大。也就是说,蓄水会导致库区原有地层特性发生变化^[20],这种变化会打破原有的平衡状态,并达到新的应力平衡状态^[21]。

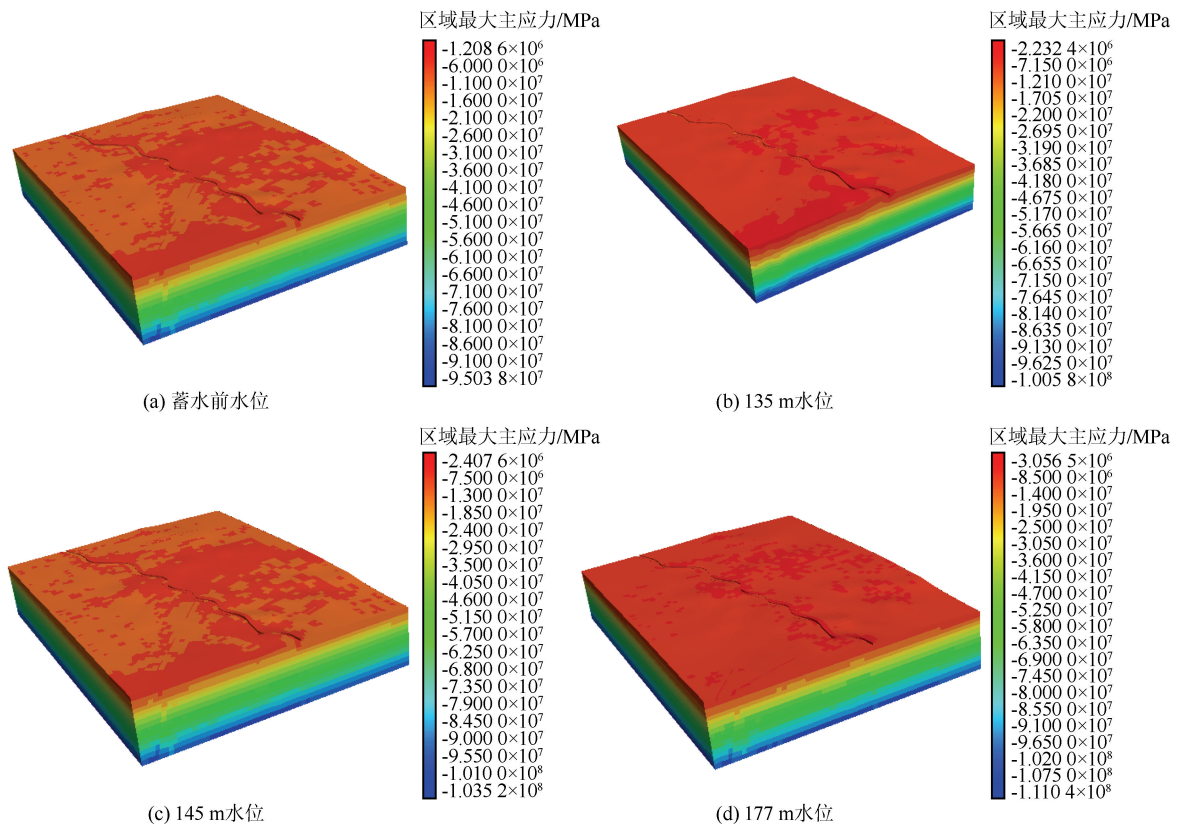


图 6 不同蓄水期最大主应力云图

Fig.6 Maximum principal stress during different impoundment periods

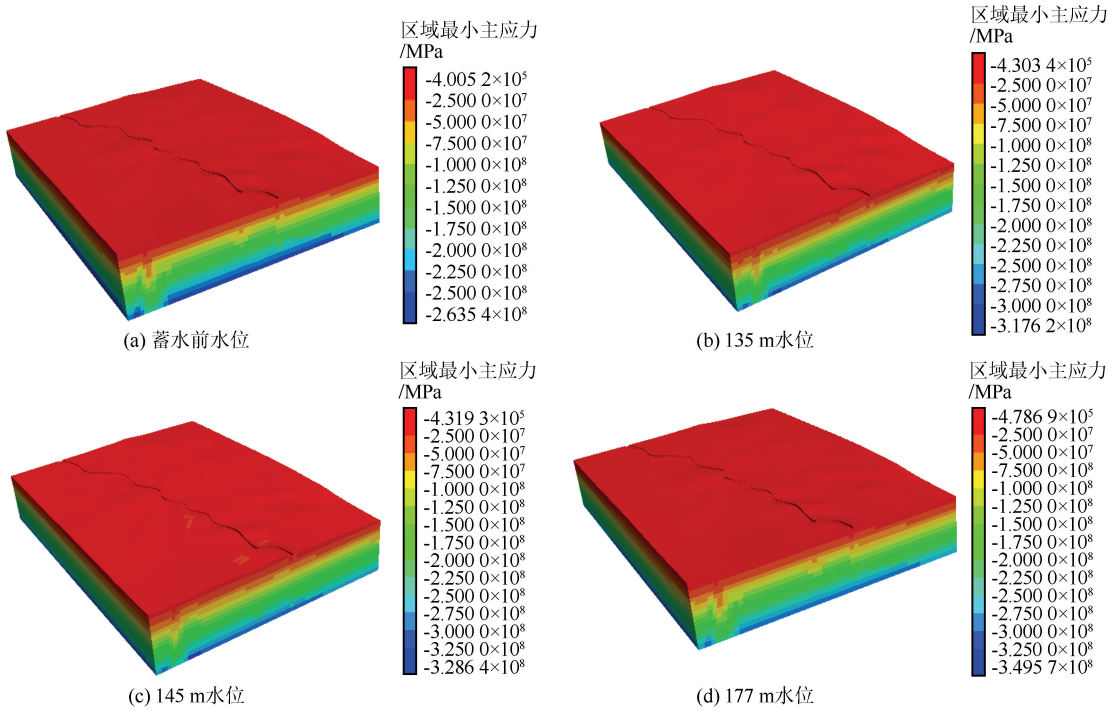


图 7 不同蓄水期最小主应力云图

Fig.7 Minimum principal stress during different impoundment periods

随着库首区主应力的变化,剪应变增量分布也发生了变化。不同蓄水期库首区地表以下 500 m 处的剪应变增量分布如图 8 所示。由图 8 可知,蓄水前剪应变增量为 0.012 7;当蓄水深度在 135 m 时,

剪应变增量为 0.015 5;在蓄水深度为 145 m 时,剪应变增量为 0.016 1;在蓄水深度达 177 m 时,应变增量为 0.021 2,即剪应变增量随着水位的上升而逐渐增大。从切片云图看,地表以下 500 m 深度处剪应

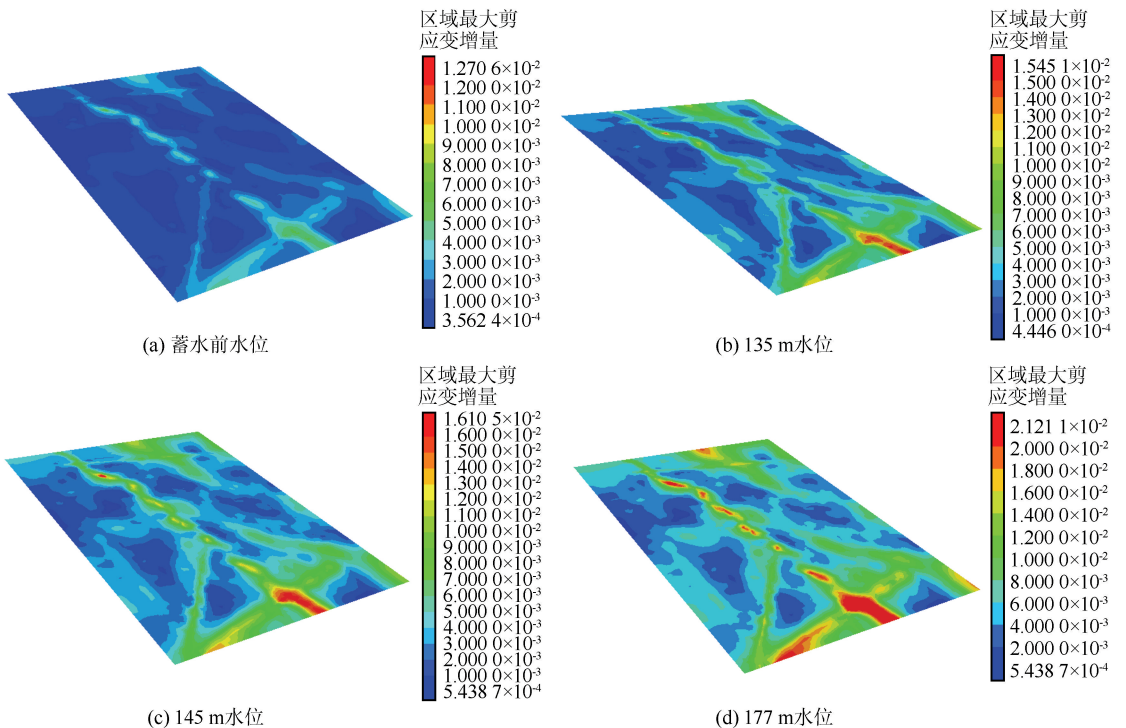


图 8 不同蓄水期剪应力增变云图

Fig.8 Shear stress increases during different impoundment periods

变增量带顺切片界面延伸^[22],大体集中分布在水库、仙女山断裂、九畹溪断裂及高桥断裂处,表现为多个分支。随着蓄水深度不断增加,库水渗透加剧,导致土壤以及岩层的含水量增多,水的渗透和扩散会使周围岩层发生一定程度的软化,最终导致原本不稳定的断层体系更加不稳定。随着断层注水的增多,剪应变增量逐渐增大。如果断层原本处于一种平衡状态,注水后增加的水压力可能会打破这种平衡,使得断层重新运动,这样就会导致断层内部结构平衡被打破,从而诱发地震。借鉴剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用^[23],剪应变增量带在断层及水库下方连续性较好,而在远离坝区区域的连续性较差,剪应变增量带的分布范围恰恰是最不稳定的区域,也是最容易发生失稳破坏的。水库库区失稳,一般都是沿着剪应变最大的部位发生,大量工程实例也验证了这一点。

4 结论

通过分析三峡库首区蓄水前后应力场变化与地震活动的关系,得到以下结论:

(1) 从模拟结果分析可知,库首区的最大主应力和最小主应力都会随着水位的上升而增大。与蓄水前相比,蓄水深度分别为135、145和177 m时,最大主应力增幅分别为5.8%、13.1%和16.8%,最小主应力增幅分别为20.5%、20.5%和32.6%。主应力数值与蓄水位存在正相关性,蓄水位的变化对地震的发生起到了催化作用。

(2) 不同蓄水期的剪应变增量在九畹溪断裂、仙女山断裂和高桥断裂较为集中,库水荷载对断层产生的剪应力的直接作用极大地增加了地震发生的可能性。

(3) 库首区受到渗流的影响增大,考虑到水库的荷载增多等因素,使得水库周围的地面发生弹性变形。蓄水导致库首区应力场发生变化,体现在地面垂直应力增加的同时水平应力减小,对地下水和地质构造产生影响;库水荷载产生的附加应力叠加在构造应力场的间接作用,对诱发三峡库首区水库地震也起到了推动作用。

(4) 本研究没有考虑温度的影响。实际上,温度也会影响地下流体的渗流,从而影响库区的应力分布。因此,在以后的研究中考虑温度的影响会使研究结果更精确。

参考文献(References)

[1] 王孔伟,路永强,聂进,等.三峡库区仙女山和九畹溪断裂带水

库地震变化规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(2):624-637.

WANG Kongwei, LU Yongqiang, NIE Jin, et al. Earthquake variation law of Xiannüshan and Jiawanxi fault zones in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 624-637.

[2] 何超枫.三峡库首区仙女山—九畹溪断裂带活化特征研究[D].武汉:中国地震局地震研究所,2016.

HE Chaofeng. Study on fault reactivation feature of Xiannüshan—Jiawanxi fault zone in the head area of the Three Gorges[D]. Wuhan: Institute of seismology, China Earthquake Administration, 2016.

[3] ZHANG Z X, ZHANG H J, HAN L Q, et al. Multi-slip surfaces searching method for earth slope with weak interlayer based on local maximum shear strain increment[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 147: 104760.

[4] 朱家正,孙玉军.四川大岗山水库蓄水对地震活动影响的数值模拟研究[J].地球物理学报,2022,65(10):3930-3943.

ZHU Jiazheng, SUN Yujun. Numerical simulation of the effect of water storage on seismic activity in Dagangshan Reservoir, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3930-3943.

[5] 杨清源,胡毓良,陈献程,等.国内外水库诱发地震目录[J].地震地质,1996,18(4):453-461.

YANG Qingyuan, HU Yuliang, CHEN Xiancheng, et al. Catalogue of reservoir-induced earthquakes at home and abroad[J]. Seismology and Geology, 1996, 18(4): 453-461.

[6] 龚钢延.孔隙压力扩散与水库诱发地震活动性的初步研究[J].西北地震学报,1988,10(1):52-59.

GONG Gangyan. Primary research on pore pressure diffusion with reservoir-induced seismicity[J]. Northwestern Seismological Journal, 1988, 10(1): 52-59.

[7] 虞金鑫,王秋良,赵艳南.基于流固耦合理论的三峡库首区蓄水后附加应力场研究[J].大地测量与地球动力学,2020,40(9):928-930,941.

YU Jinxin, WANG Qiuliang, ZHAO Yannan. Stress field of the Three Gorges based on fluid-solid coupling simulation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(9): 928-930, 941.

[8] 李保民.基于有限差分法的水库透水性能研究[J].海河水利,2023(5):77-80.

LI Baomin. Research on permeability performance of reservoir based on finite difference method[J]. Haihe Water Resources, 2023(5): 77-80.

[9] 王秋良,张丽芬,廖武林,等.三峡库首区断裂构造与地震活动特征[J].大地测量与地球动力学,2013,33(5):29-33.

WANG Qiuliang, ZHANG Lifan, LIAO Wulin, et al. Fault tectonics and seismic activity characteristics of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5): 29-33.

[10] 许忠淮,阎明,赵仲和.由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J].地震学报,1983,5(3):268-279.

XU Zhonghuai, YAN Ming, ZHAO Zhonghe. Evaluation of

- the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1983, 5(3): 268-279.
- [11] 李传亮,朱苏阳.再谈双重有效应力:对《双重有效应力再认识及其综合作用》一文的讨论与分析[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(4): 414-429.
- LI Chuanliang, ZHU Suyang. Discussion of dual effective stresses in porous media: analysis on the paper of *re-recognition of dual effective stresses and the comprehensive effect*[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(4): 414-429.
- [12] 周永利.基于 AutoCAD 与 ANSYS 建立 FLAC^{3D} 模型的边坡稳定性分析[J]. *中国科技信息*, 2009(19): 90-92.
- ZHOU Yongli. Slope stability analysis of FLAC^{3D} model based on AutoCAD and ANSYS[J]. *China Science and Technology Information*, 2009(19): 90-92.
- [13] 张玉新,钟毅,王华昆,等.塑性成形中的六面体网格划分与重划分技术[J]. *锻压技术*, 2004, 29(6): 33-35, 61.
- ZHANG Yuxin, ZHONG Yi, WANG Huakun, et al. Meshing and remeshing techniques of hexahedral elements in plastic forming[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2004, 29(6): 33-35, 61.
- [14] 李井冈山,张丽芬,廖武林,等.褶皱构造中的地震:2017 年三峡库区巴东 M4.3 地震序列成因讨论[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(9): 3701-3712.
- LI Jinggang, ZHANG Lifan, LIAO Wulin, et al. Earthquakes in the fold structure: the genesis of the M4.3 earthquake sequence in the Three Gorges Reservoir area in 2017[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3701-3712.
- [15] 刘港,赵海军,马凤山,等.裂隙岩体渗流应力耦合研究现状与展望[C]//2017 年全国工程地质学术年会论文集.桂林:《工程地质学报》编辑部,2017: 235-247.
- LIU Gang, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Present situation and prospect of seepage stress coupling research in fractured rock mass[C]//Proceedings of the 2017 National Academic Conference on Engineering Geology. Guilin: Editorial Department of *Journal of Engineering Geology*, 2017: 235-247.
- [16] 孟庆筱,姚运生,廖武林,等.三峡蓄水进程中库首区地震活动与库水位的关联性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(7): 714-720.
- MENG Qingxiao, YAO Yunsheng, LIAO Wulin, et al. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level at the head area of the Three Gorges Reservoir in the impoundment process[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(7): 714-720.
- [17] 水利水电科学研究院,水利水电规划设计院,水利水电情报研究所,等.岩石力学参数手册[M].北京:水利电力出版社,1991.
- Institute of Water Resources and Hydropower Research, Renewable Energy Engineering Institute, Water Resources and Hydropower Information Research Institute, et al. Handbook of rock mechanics parameters[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1991.
- [18] 谢向东.基于流固耦合理论的丹江口水库诱发地震机理研究[D].武汉:武汉大学,2010.
- XIE Xiangdong. Study on mechanism of reservoir-induced seismicity based on theory of fluid-solid coupling in the Danjiangkou Reservoir area[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [19] YAO Y S, WANG Q L, LIAO W L, et al. Influences of the Three Gorges Project on seismic activities in the reservoir area[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(15): 1089-1098.
- [20] 张红艳,谢富仁,荆振杰.京西北盆地构造区现代构造应力场的非均匀特征[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(12): 3061-3071.
- ZHANG Hongyan, XIE Furen, JING Zhenjie. Research on heterogeneity of the present tectonic stress field in the basin-and-range province northwest of Beijing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(12): 3061-3071.
- [21] 常婷.三峡秭归 M4.5、吉林松原 M5.5 地震序列库仑应力变化的对比研究[D].武汉:中国地震局地震研究所,2021.
- CHANG Ting. Comparative study on Coulomb stress change of Three Gorges Zigui M4.5 and Jilin Songyuan M5.5 seismic sequence[D]. Wuhan: Institute of seismology, China Earthquake Administration, 2021.
- [22] CUI G J, ZHANG C Q, YE J P, et al. Influences of dynamic normal disturbance and initial shear stress on fault activation characteristics[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(5): 159.
- [23] 丁秀美,刘光士,黄润秋,等.剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(增刊 1): 318-323.
- DING Xiumei, LIU Guangshi, HUANG Runqiu, et al. Application of shear strain increment in stability study of accumulation slope [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19 (Suppl01): 318-323.

(本文编辑:贾源源)