

三峡水库蓄水后等效应力场的数值模拟和 胡家坪 $M_s 4.1$ 地震的孕震机理*

吴建超^{1,2}, 陈蜀俊^{1,2}, 蔡永建^{1,2}, 李恒^{1,2}, 雷东宁^{1,2}, 余松^{1,2},
乔岳强^{1,2}, 陈子华¹, 刘凡珍³

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉地震工程研究院, 湖北 武汉 430071;
3. 吉林省有色金属地质勘查局 607 队, 吉林 长春 132105)

摘要: 利用有限元方法, 在三峡水库 172 m 试验性蓄水后发生胡家坪 $M_s 4.1$ 地震的大背景中, 建立了三峡库首区三维线弹性有限元模型。计算得到了 172 m 水位相对于蓄水前库首区地壳 8 km 深度处的等效应力场, 与该地区同期流动重力场异常分布特征基本一致。在此基础上, 将蓄水后等效应力场的变化与胡家坪 $M_s 4.1$ 地震对比后发现, 本次地震发生在等效应力递增区与递减区的梯度带上。分析认为, 这样的地段等效应力变化明显, 是应力应变积累和构造活动强烈的部位, 加之处于仙女山断裂的北端段, 容易促使断裂失稳错动而引发地震活动。

关键词: 有限元; 数值模拟; 等效应力场; 梯度带; 三峡水库

中图分类号: P315.9; TV697.2*4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)01-0042-06

进一步的探索。

0 引言

三峡水库自 2003 年 6 月第一次蓄水以来, 目前已成功实现了 172 m 水位的试验性蓄水, 标志着这个世界最大水利枢纽工程的防洪、发电、通航等功能均达到了设计要求, 综合效益得到了充分发挥。然而自 2003 年 6 月蓄水以来, 在三峡库区共发生近 7 000 次地震, 而且绝大多数 $M1.0$ 以下地震属于非构造成因的水库诱发地震(车用太等, 2009)。然而, 2008 年 9 月第 3 期蓄水前后, 2008 年 9 月 27 日和 11 月 22 日在三峡库首区分别发生 $M3.2$ 与 $M_s 4.1$ 地震, $M_s 4.1$ 地震是三峡水库蓄水以来在库首区内发生的最大地震。

陈蜀俊等(2006)和吴建超等(2009)曾对三峡水库蓄水后全位移场的变化进行了数值模拟, 但仅局限于分析上地壳表层($Z = -1.5$ m)的位移场, 没有讨论水库诱发地震更深层次的动力成因。本文从库首区上地壳应力场尤其是等效应力场分析的角度对水库诱发地震震例及地震活动性进行分析, 对三峡水库诱发地震机理研究进行更

1 胡家坪 $M_s 4.1$ 地震概况

2008 年 11 月 22 日 16 时 01 分胡家坪 $M_s 4.1$ 地震发生, 震中位于宜昌市秭归县屈原镇胡家坪(31°N , 110.8°E), 震源深度约为 8 km, 震中烈度为 VI 度。震源机制解揭示出震源破裂为 NNW 向断裂的逆冲左旋走滑错动, P 轴压应力方位角为 287° , 仰角为 33° , 主要受压应力作用(图 1)。这次地震的有感范围较大, 西自巴东官渡口镇, 东至宜昌夷陵区, 北自兴山县, 南至秭归县杨林镇, 总面积约 400 km^2 。

车用太等(2009)研究认为, 胡家坪 $M_s 4.1$ 地震属构造型水库诱发地震, 是第三次水库蓄水引起的水体荷载加剧了断层面上的剪应力作用, 同时增大了断层面上的正应力作用, 最终导致库仑破裂应力增大, 从而引发了地震。田宗伟(2008)认为, 本次地震属三峡地区正常背景条件下发生的构造地震。然而, 他们都是基于有关地质资料和现场地震考察资料来进行分析讨论, 并

* 收稿日期: 2011-01-13.

基金项目: 中国地震局地震研究所基金“三峡水库蓄水后等效应力场的变化与胡家坪 $M_s 4.1$ 级地震的关系研究”(IS201056088)资助。

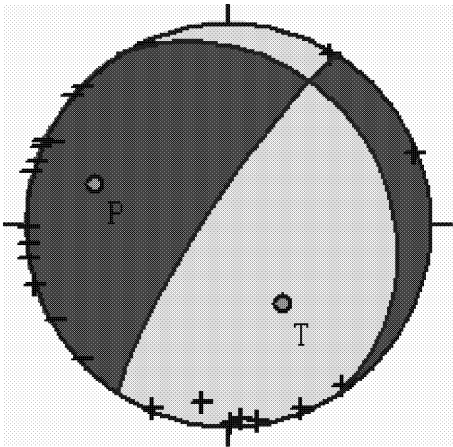


图 1 胡家坪 $M_{\text{s}}4.1$ 地震的震源机制解
Fig. 1 Focal mechanism solution of the Hujiaping $M_{\text{s}}4.1$ earthquake

未从定量角度对蓄水导致的应力变化进行计算。因此，十分有必要对蓄水所导致的库首区孕震动力环境进行数值计算，从上地壳深处研究本次地震的震背景（王博等，2008；廖武林等，2009）。

2 库首区有限元模型的建立

2.1 几何参数模型

本文所确定的库首区研究范围为 $110\text{ km} \times 85\text{ km}$ ，厚度取至上地壳底部埋深 12 km 处。因此，该几何模型可以看做是长轴沿 NW—SE 方向延伸的六面体（图 2）。以 $(31^{\circ}56'35''\text{N}, 110^{\circ}00'00''\text{E})$ 为坐标原点， X 轴方向为 $\text{SE}33^{\circ}$ ， Y 轴方向为 $\text{NE}33^{\circ}$ ， Z 轴垂直于水平面，向上为正。 $Z=0$ 相当于海拔高程 50 m 。

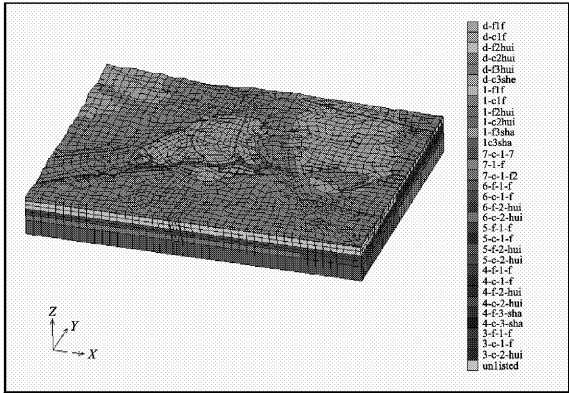


图 2 三峡库首区三维数值模拟模型图
Fig. 2 3D numerical simulation model of the head area of the Three Gorges

2.2 力学参数模型

力学参数模型按地层岩性可划分为沉积盖层和基底构造层：第一层厚约 7 km ，主要岩石类型为花岗岩、灰岩和砂岩；第二层厚约 5 km ，主要岩石类型为花岗岩。考虑到其内部详细岩石类型及参数对模拟计算结果的影响，该模型共划分了 7 层，各层底面 Z 轴坐标自上而下分别为： -1.5 、 -3 、 -4 、 -5 、 -7 和 -12 km ，各层分别对应不同的岩石类型及参数（表 1）。

表 1 研究区主要岩石力学参数表
Tab. 1 Main parameters of the rock mechanics in study area

岩 性	统计状态	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
砂岩	天然	35.46	0.22	2.63
	饱水	30	0.24	2.66
砂岩 + 构造角砾岩	天然	10.70	0.24	2.57
	饱水	9.10	0.27	2.59
灰岩	天然	30.6	0.20	2.68
	饱水	26	0.23	2.69
灰岩 + 构造角砾岩	天然	21.22	0.23	2.66
	饱水	18.0	0.26	2.67
花岗岩	天然	40	0.18	2.69
	饱水	35	0.2	2.70
花岗岩 + 构造角砾岩	天然	5 ~ 10	0.25	2.56
	饱水	5	0.26	2.57

本文采用连续介质力学方法对断层模型进行研究，即断层内为弱介质夹层，其厚度不为零，也不能忽略。为模拟断层应力场的变化途径和变化趋势，取断裂带的材料为弹塑性材料。依据前人研究及本区工程研究中得出的岩石力学参数，本文统计得出断裂带的参数分别为：弹性模量 $E = 1.07 \times 10^{10}\text{ Pa}$ ，泊松比 $\nu = 0.24$ ，密度 $\rho = 2\,570\text{ kg/m}^3$ 。

2.3 边界条件模型

根据 Wang 等（2001）利用 GPS 数据获得的中国大陆水平方向速度场可知，包括研究区在内的整个华南块体总体向 SE 方向运动，地幔流总体向东运移、牵引。因此，首先对模型的 NW 向侧面作 X 向约束。

三峡库首区的黄陵背斜为一古老的刚性地质体，根基深深扎入下地壳，为下元古界—上元古界基底，并在漫长的地质历史中表现为隆起和对

区域应力作用产生强大的反作用力。因此,模型对黄陵背斜核部作 X 向和 Y 向约束。对模型的底面,即 $Z = -12$ km 处作 Z 向的约束,模型顶面及其它侧面为自由面,不作任何约束。

依据陈蜀俊等(2005, 2006)和吴建超(2010)的研究,本文选用的加载方式为:NE50°方向压应力大小为 790 MPa, NW320°方向张应力大小为 540 MPa。采用三维线弹性模型,除作了约束的部位外,每个节点有三个自由度。以满足计算精度为要求作有限元网格划分,对断裂带附近和重点研究区域,例如巴东库段和香溪库段的网格再做细化。本次计算模型单元数共计 17 146 个,节点数共计 20 264 个。

3 蓄水达 172 m 水位后等效应力场的数值模拟

三峡水库蓄水后,提升了长江上游水位,并淹没了长江部分支流河段,库水影响范围内的水文地质条件和岩石物性参数必将发生变化。本文着重考虑了三峡水库蓄水达 172 m 水位后,水体荷载作用、应力腐蚀作用和孔隙水压作用的影响。依据蓄水后 GPS 形变场、重力场实测结果对模型进行了调整,计算得到了蓄水前后三峡库首区等效应力场的三维数值模拟结果。

3.1 等效应力的含义

弹塑性力学中,等效应力定义为在一般应力状态下的各应力分量经适当的组合而形成的与单向应力等效的应力,也称比较应力、统一应力和应力强度(陈明祥, 2007; 张林洪等, 2002, 2004),等效应力用主应力表示为

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1)$$

式中, σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为最大、中间、最小主应力。

朱守彪和张培震(2009)对汶川地震的发生过程进行了有限元的数值模拟,讨论了等效应力与地震活动的关系,结果显示等效应力在空间分布上由地震前的分散状态逐渐向龙门山地区集聚并增大,空间上龙门山断裂带成为了等效应力积累单元。应力水平不断升高,直至超过摩擦极限,最终导致了汶川地震的发生。因此,本文选择三

峡库首区上地壳深处的等效应力场作为研究对象,探讨蓄水后等效应力场的变化及其与胡家坪 $M_s 4.1$ 地震的关系。

3.2 数值模拟结果分析

本文的研究重点是上地壳深部等效应力场的变化,考虑到胡家坪 $M_s 4.1$ 地震的震源深度为 8 km,因此,取 $Z = -8$ km 作为输出层,得到蓄水达 172 m 水位后等效应力场的结果(图 3)。

三峡水库 172 m 水位试验性蓄水之后,地壳深处 8 km 附近沿新滩、归州和周坪三地出现了较大范围的等效应力高值区,等效应力值约为 900 MPa,长轴近似呈 NE 向。分析该等效应力高值区附近的地质构造,笔者认为该等效应力高值区与九畹溪断裂、仙女山断裂及新华—水田坝断裂的围限作用有关,同时还可能与该区域的库水渗透作用有密切关系。

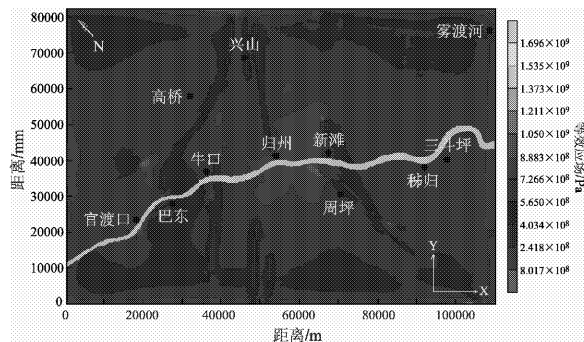


图 3 蓄水达 172 m 水位时三峡库首区 8 km 深处等效应力场图

Fig. 3 Equivalent stress field in 8km depth of the head area of the Three Gorges impounding under the 172 m water level

为了分析数值模拟结果的可靠性,笔者选择了重力实测资料作为验证(车用太等, 2009)。三峡水库蓄水达 172 m 水位后,在香溪—茅坪之间水库北岸存在重力正异常,异常幅度达 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (图 4)(车用太等, 2009)。该重力场的异常区展布方向与水库走向一致。将数值模拟得到的蓄水后等效应力结果与重力实测结果对比,发现蓄水达 172 m 水位后,库首区沿着新滩、归州和周坪三地出现了较大范围的等效应力高值区,不考虑边界效应和断裂端部的影响,这一等效应力高值区是研究范围内唯一比较明显的

区域。等效应力高值区（图 3）位于本文三维模型的中部，受底面边界条件的影响较小，模拟结果较为准确可靠。该区域与重力实测得到的异常区基本对应，且均分布于长江两岸约 10 km 范围内。

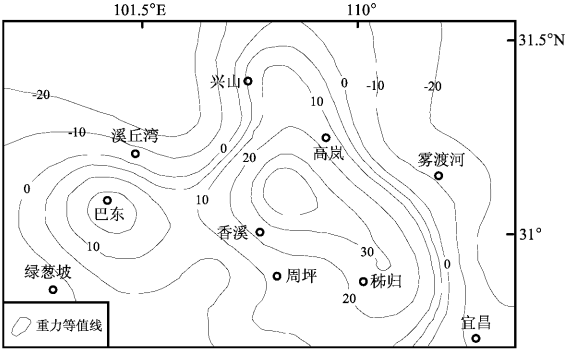


图 4 胡家坪 $M_s4.1$ 地震前的三峡库首区流动重力场异常

Fig. 4 Mobile gravity field abnormality of the head area of the Three Gorges before Hujiaping $M_s4.1$ earthquake

3.3 等效应力的差值变化与胡家坪 $M_s4.1$ 地震关系

等效应力的差值变化分析，集中反映了直接由蓄水引起的等效应力的变化及其分布特征，是蓄水引起库首区孕震环境变化的有力证据之一。为了得到三峡水库蓄水后等效应力场的差值变化，笔者将本文数值计算的 172 m 水位与蓄水前的等效应力值相减，并采用局部多项式插值方法，得到了 172 m 水位时相对蓄水前的等效应力差值图（图 5）。

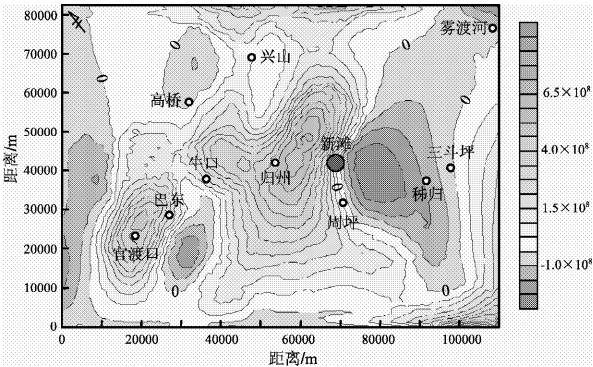


图 5 172 m 水位相对蓄水前的等效应力差值

Fig. 5 Equivalent stress difference between water level is 172 m and before impoundment

由图 5 可以发现，172 m 水位相对于蓄水前的等效应力差在巴东、归州和新滩镇出现了 3 个正高极值区，其中以新滩极值区的范围和量级最大，呈 NE—SW 向延伸，极值区的等效应力值由中心向两侧逐渐减小。香溪正高极值区的南东侧为一负低极值区，呈近 SN 向延伸，量值较小。三峡水库蓄水达 172 m 水位后，胡家坪 $M_s4.1$ 地震就发生在正负异常的边界带上，也即香溪正高极值区和秭归负低极值区的过渡带上。此过渡带等效应力变化明显，易于应力和应变能的集中，加之此过渡带处于仙女山断裂北端段，容易促使断裂端部失稳错动而引发地震活动。

4 胡家坪 $M_s4.1$ 地震的孕震机理

胡家坪 $M_s4.1$ 地震的震区，位于鄂西黄陵背斜与秭归向斜之间的沉积地层发育区。地震的宏观震中位于三叠系上统的灰岩地层，岩溶较为发育且渗透性较强。如图 6 所示，香溪库段 $M_L \geq 2.0$ 地震破裂面走向较为集中，主要为 NW 向和 NNE 向，与香溪库段的仙女山断裂及九畹溪断裂呈现了较好的对应关系。

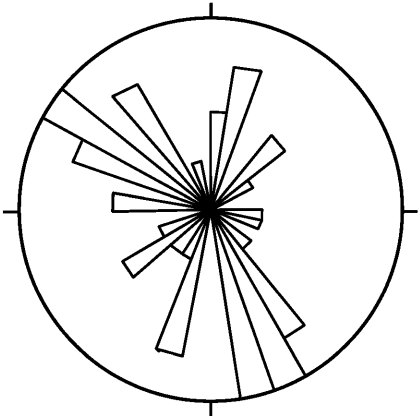


图 6 三峡水库蓄水后香溪库段 $M_L \geq 2.0$ 地震破裂面走向分布图

Fig. 6 Strike distribution of rupture plane of the earthquake with $M_L \geq 2.0$ in Xiangxi zone after impounding of Three Gorges reservoir

笔者研究认为，胡家坪 $M_s4.1$ 地震发生在蓄水后等效应力高值区与东部大范围低值区的过渡带上，等效应力差值约为 400 MPa。该过渡带属于等效应力变化最为剧烈、最易产生应变能积累和

应力集中的区域。蓄水后引起等效应力场的变化的原因可能是库水荷载、下渗腐蚀背景下引起的水文地质条件变化及上地壳表层应力状态调整的结果。三峡水库 172 m 水位试验性蓄水进一步加剧了断面上的压应力作用,同时库水下渗导致了断裂带上孔隙水压显著增大,最终导致库仑破裂应力增大,引发了胡家坪 $M_s4.1$ 构造型水库诱发地震。

5 结语

(1) 利用有限元方法计算得到了蓄水达 172 m 三峡库首区 8 km 深处的等效应力场,与流动重力场异常变化图像基本一致。沿新滩、归州和周坪三地出现了等效应力高值区,反映了 172 m 水位蓄水造成的上地壳等效应力场变化的基本状况。

(2) 172 m 水位相对于蓄水前的等效应力差在巴东、归州和新滩镇出现了 3 个正高极值区,蓄水达 172 m 水位后,胡家坪 $M_s4.1$ 地震发生在香溪正高极值区和秭归负低极值区的过渡带上。这样的地段等效应力变化明显,易于应力和应变能的集中,加之处于仙女山断裂北端段,容易促使断裂失稳错动而引发地震活动。

(3) 胡家坪 $M_s4.1$ 地震可能是库水荷载、下渗腐蚀背景下引起的水文地质条件变化的结果。三峡水库 172 m 水位试验性蓄水进一步加剧了断面上的压应力作用,同时库水下渗导致了仙女山断裂带上孔隙水压显著增大,最终导致库仑破裂应力增大,引发了胡家坪 $M_s4.1$ 构造型水库诱发地震。

参考文献:

- 车用太,陈俊华,张丽芬,等. 2009. 长江三峡工程库首区胡家坪 $M_s4.1$ 水库诱发地震研究[J]. 地震,29(4):1-13.
- 车用太,刘五洲. 1998. 地壳流体与地震活动关系及其在强震预测中的意义[J]. 地震地质,20(4):431-437.
- 陈明祥. 2007. 弹塑性力学[M]. 北京:科学出版社.
- 陈蜀俊,姚运生,蔡永建. 2006. 三峡库首区重点断裂围限区蓄水的加卸载效应[J]. 大地测量与地球动力学,26(4):97-101.
- 陈蜀俊,姚运生,曾佐勋,等. 2005. 三峡库首区蓄水前后构造应力场三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,4(2):5 612-5 617.
- 陈蜀俊. 2005. 三峡库首区蓄水前后构造应力场数值模拟及地震危险性研究[D]. 武汉:中国地质大学.
- 廖武林,张丽芬,姚运生. 2009. 三峡水库地震活动特征研究[J]. 地震地质,31(4):707-714.
- 田宗伟. 2008. 中国地震局地震研究所水库诱发地震研究室王秋良博士:秭归县 4.1 级地震属三峡地区正常背景条件下发生的构造地震[J]. 中国三峡建设(科技版), (1):56-63.
- 王博,刘耀伟,孙小龙. 2008. 地下流体与断裂活动关系的研究综述[J]. 地震研究,31(3):296-302.
- 吴建超,陈蜀俊,陈俊华. 2009. 三峡水库蓄水后全位移场变化的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学,29(6):52-55.
- 吴建超. 2010. 三峡库首区三维数值模拟及地震危险性研究[D]. 武汉:中国地震局地震研究所.
- 张林洪,刘荣佩,周建芬,等. 2002. 构造型水库地震的断裂力学分析[J]. 地震研究,25(2):186-191.
- 张林洪,刘荣佩,周建芬,等. 2004. 库水压力作用下不同类型断层诱发水库地震的可能性分析[J]. 地震研究,27(3):241-245.
- 朱守彪,张培震. 2009. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震发生过程的动力学机制研究[J]. 地球物理学报,52(2):418-427.
- Wang Q, Zhang P Z, Freemueller J T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positional system measurements[J]. Science,294(5542):574-577.

Numerical Simulation of Equivalent Stress Field after the Impoundment of the Three Gorges Reservoir and the Seismogenic Mechanism of Hujiaping $M_s4.1$ Earthquake

WU Jian-chao^{1,2}, CHEN Shu-jun^{1,2}, CAI Yong-jian^{1,2}, LI Heng^{1,2}, LEI Dong-ning^{1,2},
YU Song^{1,2}, QIAO Yue-qiang^{1,2}, CHEN Zi-hua¹, LIU Fan-zhen³

(1. *Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(2. *Institute of Earthquake Engineering in Wuhan, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(3. *Group 607 in Nonferrous Metals Geological Exploration Bureau of Jilin Province, Changchun 132105, Jilin, China*)

Abstract

Using finite element method, we established a 3D linear elastic finite element model of the head area of the Three Gorges Reservoir after the Hujiaping $M_s4.1$ earthquake occurred after the 172 m level experimental impoundment. Then we calculated and obtained the equivalent stress field under 172 m water level and that in 8 km depth in the head area of the Three Gorges before impoundment, which are consistent with the distribution characteristics of contemporaneous flowing gravity field abnormality in this area. On this basis, we compared the equivalent stress field changes after the impoundment with the Hujiaping $M_s4.1$ earthquake, and found that this earthquake occurred in the gradient zone between the increasing zone and decreasing zone of the equivalent stress. We analyzed that the equivalent stress varied distinctly in the gradient zone, where the stress and strain was accumulated and tectonic activity was intense. In addition, the gradient zone is located in the north section of the Xiannushan Fault, which is easy to make fault instable and move to induce the seismic activity.

Key words: finite element; numerical simulation; equivalent stress field; gradient zone; Three Gorges Reservoir