

# 考虑断裂破碎带的丹江口库区 地应力场与水压应力场耦合反演及地震预测

谢向东<sup>1</sup>, 刘素梅<sup>2</sup>

( 1. 湖北文理学院机械与汽车工程学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072 )

**摘要:** 根据丹江口库区的地质构造特征, 运用 ABAQUS 软件建立考虑断裂破碎带的三维有限元新模型, 反演两场相互作用下库区的地应力场和应变场, 分析水库二期蓄水后库区的稳定情况并预测丹江口库区二期工程诱发地震的可能性与危险区。研究表明: 二期蓄水后沿公路断裂带沿线以南、丹江断裂带以东、均陨断裂带以北和丹江断裂带以西这些浅层拉应力区可能会因为受拉破坏引发一系列微震; 光化、谷城、石化街地区、丹江断裂带的东南段和公路破碎带沿线可能会因为剪切滑移诱发一系列的微震; 宋湾外围、林茂山外围、丹库的外围可能会因为库水下渗和剪切滑移诱发一些小震; 老均县南北一线、保康—远安一线、襄阳—钟祥一线和郢县—习家店一线可能会因为剪切滑移诱发一些小震。

**关键词:** 水压应力场; 地应力场; 水库诱发地震; 丹江口水库

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)04-0529-07

丹江口水库是南水北调工程中线的源头, 分两期开发。初期工程于 1973 年完成, 自 1967 年 11 月 5 日丹江口水库大坝下闸蓄水后库区地震活动有所加强, 并于 1973 年 11 月 29 日在宋湾瓦房沟诱发了蓄水以来的最大震级 (4.7 级), 此后一直处于地震平静期<sup>[1-2]</sup>。水库续建工程计划提高水位至 170 m, 水位的提高是不是会引起新一轮的地震活动一直是地震工程界和水利工程界共同关注的问题。国内外不少专家学者对水库 (丹江口水库) 诱发地震作了大量的研究: 荣建东, 耿爱玲<sup>[2]</sup>总结了近 30 年来丹江口地区地震观测台网完整记录到的蓄水过程的水库诱发地震序列, 阐明了所取得的观测成果和存在的问题。李珏, 刘行松<sup>[3]</sup>对均郢断裂带和丹江断裂的地质资料以及长期和近期活动性等方面作了详细的整理并分析了丹江口库区发生水库地震的原因, 对未来水库地震的地点和强度进行了预测。高锡铭, 殷志山<sup>[4]</sup>对汉江丹江口水库蓄水后的地震活动进行了整理, 并分析了库水位 (库容) 与地震频度、强度的相关性, 得出水库蓄水有助于诱发地震的结论。严尊国, 薛军蓉, 耿爱玲<sup>[5]</sup>利用震源参数和震级的关系以及地方尾波估算地震矩的方法尝试性地估算了丹江口水库及其邻区内  $M_L > 2.5$  级地震的震源参数, 并讨论了丹江口水库地震的特征。黄乃安, 张绍波<sup>[6]</sup>根据丹江口水库地震的特征和地震地质条件应用灰色系统方法, 建立了水库地震的灰色聚类预测模型及水库地震趋势的灰色灾变预测模型。运用灰色关联分析原理研究了水库模型与水库地震震级的关系。CHEN Linyue<sup>[7]</sup>对中国发生的水库诱发地震的历史案例进行了分析, 认为水库地震主要发生在由花岗岩或石灰岩形成的岩层当中, 发生在花岗岩层中的水库地震主要是孔隙压力扩散作用引起, 而发生在石灰岩层中的水库地震主要是水的化学作用引起的。MATCHARASHVILI<sup>[8]</sup>研究了大型水库水位变化对地震活动的影响提出了一个由水位周期变化引起同步地震活动的模型—同步水库诱发地震模型, 并通过美国西部乔治亚州 Enguri 大坝水库库水位的周期变化所引发的地震对这个模型的正确性进行了验证。ABAS Kangi<sup>[9]</sup>对伊朗西南部 Karan III 水库的地震进行了统计分析发现水库水位变化和水库地震之间有着显著的相关性: 当水库水位上升时很快就会引发一系列的地震; 当水位急剧变化时, 水库地震的频度也显著增加。从文献资料看目前国内外还没有人对库区的地应力场进行定量的研究, 实际上库区地应力场是诱发地震不可忽略的因素, 鉴于此武汉大学的徐礼华根据丹江口库区的地震地质构造, 建立三维有限元模型, 对库区构造地应力场和水压应力场分别进行了模拟并预测了丹江口库区发震的可能性与危险区<sup>[10-11]</sup>。由于以上工作未考虑丹江口水库多场耦合的情况和断裂破碎带的影响, 所以本文在此基础上用 ABAQUS 软件建立考虑断裂破碎带的三维有限元新模型, 对库区在地应力和水压应力共同作用下的地应力场进行了反演, 并根据反演结果得到了一些更有价值的结论。

**收稿日期:** 2013-12-05

**修改稿日期:** 2014-07-25

**基金项目:** 湖北省自然科学基金资助项目 (2012FFC05201, 2011CDB267)

**作者简介:** 谢向东(1975-), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为工程结构抗震。E-mail: xiangdongxie@163.com

## 1 丹江口库区地质条件

丹江口水库位于鄂豫两省交界地带,在构造上处于秦淮弧内侧的武当隆起边缘,青峰断裂为隆起南界,东临南襄盆地.库区地层分区以青峰为界,北为秦岭区,南为扬子区(见图1).秦岭区的基底主要由元古界的耀岭河群、郧西群及武当山群的变质中酸性火山岩组成<sup>[7]</sup>,深度大约为5~20 km.秦岭区盖层以丹江破碎带为界,分为东西两部分.东部为南襄盆地,以碳酸盐岩为主;西部以均隙破碎带为界分为南北两部分,北部以古生代沉积岩为主,南部以AH前震旦纪变质岩为主<sup>[3]</sup>.库区的断裂很多,与库区地震密切相关的主要是均郧断裂、公路断裂、丹江断裂和瓦房厂—周山断裂.均郧断裂带是一条深断裂带,纵贯武当山背斜带或中秦岭槽向斜之间从漫川关经黄云铺、郧西、老均县到赵岗的一条北西西向断裂,长达200 km,宽20~30 km不等,由一系列大断层和破碎带组成<sup>[3]</sup>.公路断裂距坝址27 km,是库区规模较大的一条断裂.丹江断裂带是本区北北西向构造带中的深断裂带之一,其北起西峡,向南延伸可与南漳—荆门断裂带相接,在区内延伸长度达300 km以上,宽50~70 km不等,由一系列大断层和破碎带组成<sup>[3]</sup>(见图2).这3条大断裂在深度上延展很深,天然地震转换波分析表明,它们的下切深度可达上地幔<sup>[11]</sup>.瓦房厂—周山断裂带是秦岭纬向构造带中一条活动断裂带,走向北西西向,与前3个大断裂相比规模较小.但根据文献<sup>[6]</sup>,丹江口水库蓄水后的1973年11月在宋湾爆发了4.7级地震,发震断层的走向大致是北西310°~320°,该走向和瓦房厂—周山断裂一致.所以,在建立计算模型时考虑该断裂.

## 2 计算模型

### 2.1 建模依据

丹江口水库包括丹库、汉库和淅库,库区大致位于东经110°45'~111°40',北纬32°34'~33°10'之间<sup>[4]</sup>.根据圣维南原理,考虑到边界效应,将计算区域取为库区范围的3倍,模型位置介于东经109°30'~112°20',北纬32°~33°30'之间.根据文献<sup>[7]</sup>,库区的主应力方向约为北70°西,所以将模型沿垂直于主应力方向切割,形成长231.5 km,宽208.4 km的矩形区域,计算几何区域见图2.由于库区盖层厚度4~5 km,以下为基岩;又根据库区的地质构造(见图3)和岩石分布,将模型分为2层,第1层厚5 km;考虑到水库诱发地震的震源深度均在20 km以内,第2层厚取为15 km.第1层以丹江破碎带和均郧破碎带为界分为3种岩石,丹江破碎带以西和均郧破碎带以北之间区域为古生代沉积岩,丹江破碎带以东为碳酸盐岩,均郧破碎带以南为AH前震旦纪变质岩;第2层为中基性火山岩.力学参数取坝基岩石的试验数据,各种岩石的力学参数见表1(其中断裂破碎带的岩石力学参数根据库区地质构造情况和数值模拟情况进行调整取值).根据丹江口库区的地质资料<sup>[3]</sup>:均郧断裂、公路断裂和丹江断裂均为深大断裂带;瓦房厂—周山断裂,从其规模、性质和影响的地层判断,它可能是在海西期或海西期以前形成的,切穿地层深度不详.本文把以上断裂破碎带的计算深度也取为20 km.由于库区周围的山川盆地相对于计算模型的20 km厚度来说是可以忽略不计的,所以本文不考虑其影响,把模型表面取为平面.

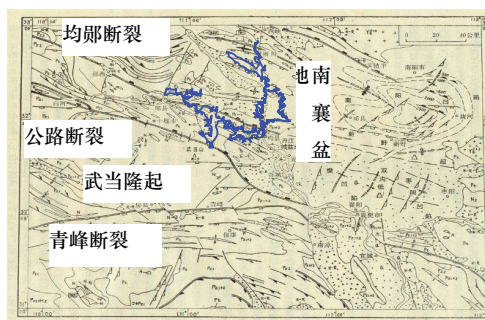
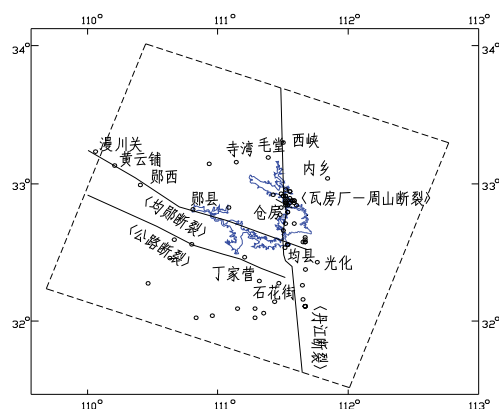


图1 丹江口水库区地理位置<sup>[3]</sup>

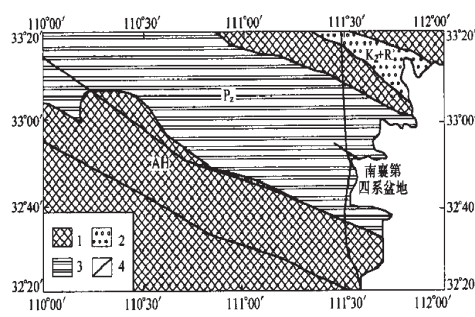
Fig.1 Geographical situation of Danjiangkou Reservoir



— 断裂 ○ 地震 水库 有限元计算区

图2 有限元模型范围及断裂和水库分布

Fig.2 The range of calculation model and the distribution of faults and reservoir



1. AH 前震旦纪变质岩; 2. K<sub>2</sub>+R 上白垩第三系;  
3. P<sub>z</sub> 古生代沉积岩; 4. 大断层

图3 丹江口水库区地质构造<sup>[4]</sup>

Fig.3 Geologic tectonics of Danjiangkou Reservoir area

表 1 丹江口库区岩石力学参数  
Tab. 1 Mechanical parameters of rocks in Danjiangkou Reservoir area

岩石类别	弹性模量/MPa	容重/kN·m <sup>-3</sup>	泊松比	摩擦角/°	粘聚力/MPa
变质岩浆岩	0.743 0E+05	29.5	0.367	50.2	5.37
火山岩	0.891 6E+05	29.5	0.367	63.1	48.20
碳酸盐岩	0.698E+05	29.5	0.367	38.5	11.30
沉积岩	0.643E+05	29.5	0.367	32.1	5.47

说明: 表中数据取自汉江丹江口水利枢纽后期续建工程初步设计阶段工程地质勘察报告

综上所述, 丹江口库区的有限元模型长 231.5 km, 宽 208.4 km, 深 20 km, 全局坐标的  $X$  轴正方向为北 70° 西。

2.2 新模型的建立

计算模型采用复合实体单元, 岩石采用 Mohr Coulomb 屈服准则。根据丹江口库区地质资料知断裂带和破碎带其实都不是完全的断裂, 为了有效地模拟断裂带的活动性质, 本文依据地质资料<sup>[3]</sup>把丹江断裂带中间沿线 500 m 宽取为丹江破碎带, 其两边各 30 km 范围为丹江断裂带; 均郢断裂带中间沿线 200 m 宽取为均郢破碎带, 其两边各 15 km 范围为均郢断裂带; 公路断裂带中间沿线 200 m 宽取为公路破碎带, 其两边各 15 km 范围为公路断裂带; 瓦房厂一周山破碎带取为 200 m 宽, 由于该破碎带较小所以认为两边没有断裂带。具体三维地质构造新模型见图 4。

2.3 计算模型

本文根据需要分两个步骤进行计算: ①底部约束  $Z$  方向的位移, 4 个侧面分别约束法向位移, 施加重力荷载; ②底部约束  $Z$  方向的位移,  $Y$  负侧面和  $X$  正侧面分别约束法向位移; 施加重力荷载同时考虑二期蓄水后库区静水压力荷载;  $X$  负侧面施加  $X$  正向位移,  $Y$  正侧面施加  $Y$  正向位移, 不断调整  $X$ 、 $Y$  正向位移使库区的应力应变状态与库区的发展情况基本吻合且使内乡测点下 550 m 深度处的主压应力的方向和大小尽可能接近实测值<sup>[10]</sup>。

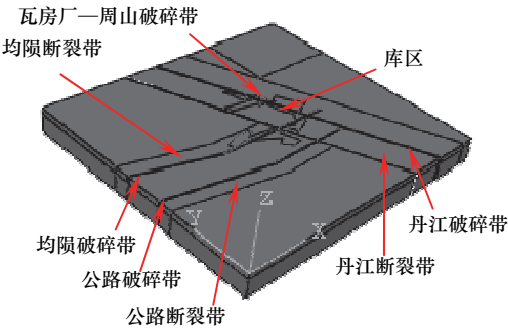


图 4 丹江口库区三维地质构造计算模型  
Fig.4 The three-dimensional calculation model of geologic tectonics in the region of Danjiangkou Reservoir

表 2 内乡测点下 550 m 深度处水平主应力计算值和实测值

比较项	$\sigma$ /MPa	主方向	$X$ 负面正向位移/m	$Y$ 正面正向位移/m
实测值	16.6	N70.0°W		
计算值	16.6	N74.9°W	90	60

3 两场共同作用的计算结果及分析

按照上述步骤②计算所得为二期蓄水后考虑地应力的水压应力场和变形场。根据计算结果: 第一主应力方向基本都平行于  $X$  轴, 第二主应力方向基本都平行于  $Y$  轴, 第三主应力(最大主压应力)方向基本都为竖直方向, 即与  $Z$  轴平行。内乡测点下 550 m 深度处第一主应力计算值与实测值见表 2。

3.1 库区不同深度主应力分布及分析

(1) 0~2 km 第一主应力有拉也有压, 随深度增加拉应力范围越来越小, 在此深度范围内拉应力从 2.5~27.3 MPa 变化, 2~5 km 拉应力逐渐变为压应力, 并且断裂带的压应力比完整岩石区的更大一些(图 5)。库

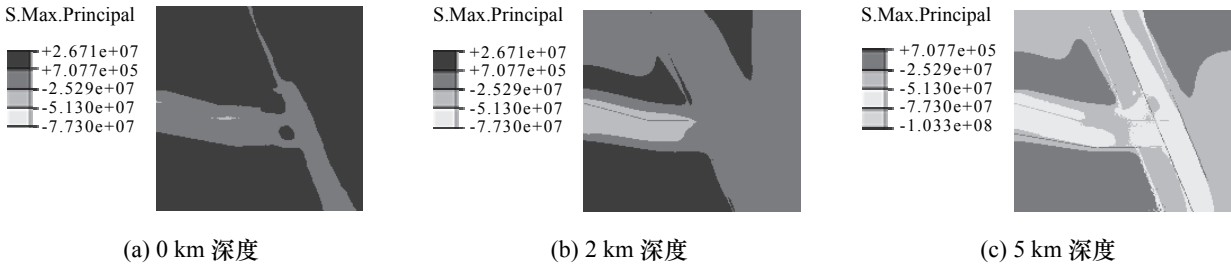


图 5 第一主应力示意图(单位 Pa)  
Fig.5 Diagram sketch of first principal stresses(unit Pa)



区浅层,第一主应力主要集中在均郧断裂带以北,公路断裂带以南,丹江断裂带以东地区(与只考虑地应力的情况一致,只是各地区的拉应力值略大4 MPa左右)。这些浅层拉应力区与库区蓄水前后的微震密集区保持一致,只是由于均郧断裂带以北和丹江断裂带以西地区存在较多的断裂在水库蓄水前就由于主拉应力作用成为微震密集区(图6);沿公路破碎带以南和丹江断裂带以东地区由于断裂较少直到水库一期蓄水后随着主拉应力的增加才成为微震密集区(图7)。由此可见本文数值模拟的结果在浅层是合理的。根据计算结果丹库周围处于受压区,所以推测丹库南北两端丹江断裂带附近的一系列微震是由于一期蓄水后库水下渗引起断裂剪切滑移而产生;二期蓄水后沿公路破碎带以南和丹江断裂带以东地区由于主拉应力的增加还将会有微震发生;均郧断裂带以北和丹江断裂带以西地区虽然由于水库蓄水前发生了一系列的微震,释放了大量的能量,但二期蓄水后随着应变能的积累,该地区还会诱发一些微震。

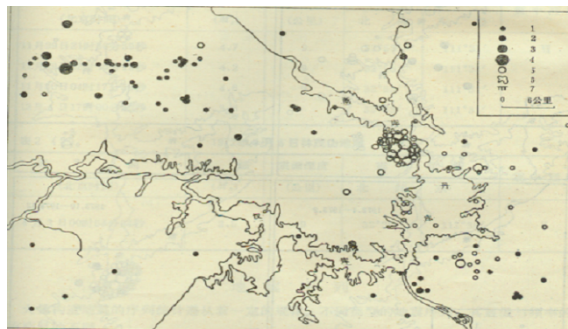


图6 丹江口库区蓄水前地震震中分布<sup>[4]</sup>

Fig.6 Distribution of earthquake epicenter before impoundment of Danjiangkou Reservoir

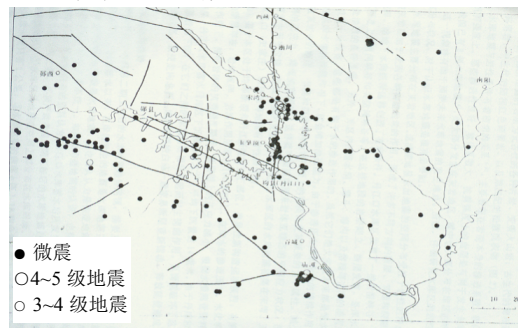


图7 丹江口水库蓄水后的地震震中分布

Fig.7 Distribution of earthquake epicenter after impoundment of Danjiangkou Reservoir

(2) 0~4 km 第三主应力分布均匀,随深度增加应力值从 34.2~117.5 MPa 逐渐增大;5 km 库区的应力分布为:断裂带 160.5~185.7 MPa;完整岩石区 102.7~110.3 MPa;破碎带 91.9~116.4 MPa;6~10 km 应力分布总体比较均匀,断裂带和完整岩石的分界处应力从小到大突变差值为 80 MPa 左右,破碎带和断裂带的分界处应力从小到大突变差值为 130 MPa 左右;11~12 km 应力均匀分布;13~20 km 完整岩石区的应力大于断裂带和破碎带的应力,并且在交界处有应力集中现象(图8)。由以上可以看出竖向剪应力主要集中在

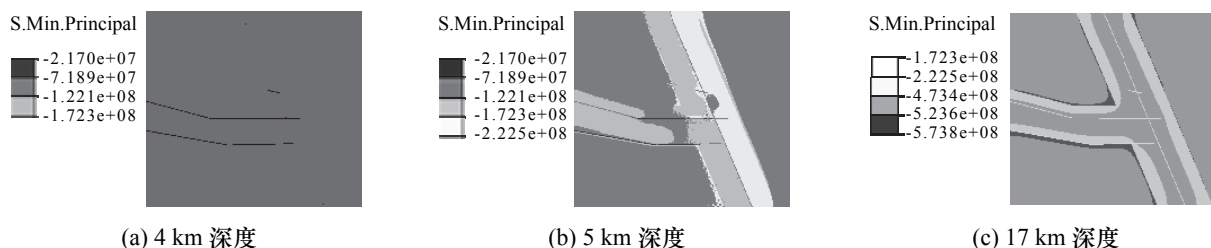


图8 第三主应力示意图(单位 Pa)

Fig.8 Diagram sketch of third principal stresses(unit Pa)

在断裂带与完整岩石以及断裂带与破碎带的过渡区,而且在 5~10 km 深度范围内更为集中,这与库区诱发地震在 5~10 km 深度范围内相吻合。据此可以解释水库一期蓄水后发生在宋湾和林茂山(灰岩峡谷区)的群震是由于断裂破碎带上剪应力集中区库水下渗导致断层面上有效应力的减小和抗剪强度的降低,从而诱发了地震;并推测水库二期蓄水后在宋湾和林茂山的外围断裂破碎带上随着库水的下渗还会诱发一系列的小震。水库二期蓄水后,巨大的水体对地壳表层的作用使地壳受压发生表层挠曲,致使水库外围已有的断裂带发生张裂,而在库区引起闭合。这种挠曲作用助长了水库外围地震的发生和减弱库区地震的活动,因此推测二期蓄水后在透水性比较好的丹江库区的外围将会诱发一系列的小震。

### 3.2 库区不同深度剪应力分布及分析

(1) 不同深度处的水平剪应力  $S_{12}$  分布以断裂带处较大,完整岩石区较小,而且随着深度的增加剪应力也增加。5 km 深度处田川、仓房处的剪应力可达 14.1 MPa;光化、谷城处的剪应力可达 15.6 MPa;石化街地区的剪应力达到 17.6 MPa;沿丹江破碎带的东南段剪应力达到 23.3 MPa,公路断裂带和均郧断裂带之间的剪应力在 3~4 MPa 之间(图9)。根据以上信息同时考虑到田川、仓房位于瓦房厂一周山断裂带、库区荷载引起的丹库和浙库之间的张拉区、宋湾群震的外围,所以推测此地区随着二期蓄水后库水的渗透可能会诱发一系列的小震;光化位于均郧断裂带东端,谷城位于丹江断裂带上,但由于光化区的林茂山群

震的发生释放了大量的应变能,谷城离水库太远,所以推测这两个地区又可能会在二期蓄水后发生一系列微震;石化街地区和丹江断裂带的东南段由于远离库区,所以推测只可能在二期蓄水后诱发一系列的微震。

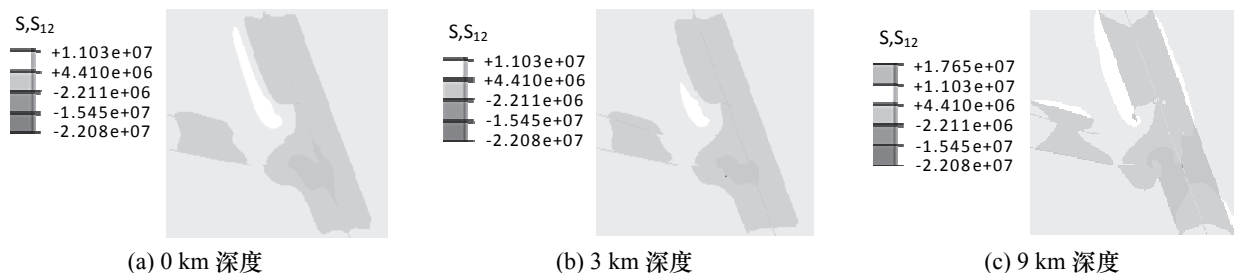


图9 剪应力  $S_{12}$  示意图(单位 Pa)

Fig.9 Diagram sketch of shear stresses  $S_{12}$ (unit Pa)

(2) 0~4 km 剪应力  $S_{13}$  分布较均匀, 5~15 km (其中 5~10 km 剪应力集中是沿深度增加的, 10~15 km 剪应力集中是沿深度减小的) 深度范围沿丹江断裂带的西边界剪应力集中高达 23 MPa, 与邻区的剪应力差值达 10 MPa 以上, 15~20 km 剪应力又趋于均匀 (图 10)。由以上剪应力分布可以看出库区的剪应力分布较小且比较均匀, 这是由于公路断裂和均郧断裂在与丹江断裂带西边线交界的地方承担了大量的竖向剪应变, 从而卸去了大部分的剪应力。根据库区的近南北向的构造断裂分布和  $S_{13}$  分布推测二期蓄水后沿老均县南北一线、保康—远安一线、襄阳—钟祥一线可能会发生一系列的小震。

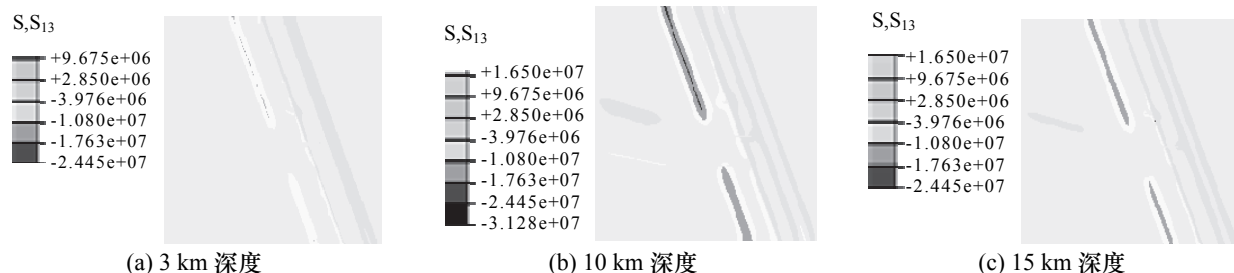


图10 剪应力  $S_{13}$  示意图(单位 Pa)

Fig.10 Diagram sketch of shear stresses  $S_{13}$ (unit Pa)

(3) 剪应力  $S_{23}$  主要集中在断裂带和破碎带的边界线, 并且随着深度的增加剪应力逐渐增大, 在各个边界线上尤以均郧断裂带的上边界线和公路断裂带的下边界线集中最为明显, 高达 20 MPa。0~10 km 深度范围内剪应力沿边界线逐渐增大, 10~20 km 深度范围剪应力沿边界线逐渐减小 (图 11)。由于剪应力主要集中在公路破碎带和均郧断裂带北端边界, 均郧断裂带北边界也就是渐库的北边界, 这就为库水沿断裂下渗透发地震创造了条件, 推测沿郧县—习家店一线可能会诱发一些小震; 沿公路破碎带沿线由于一期蓄水后近地表已经发生了一系列的微震, 但考虑到该破碎带沿深度存在较大的竖向剪应力, 所以推测二期蓄水后随着时间的推移, 有可能沿该破碎带发生一些小震。

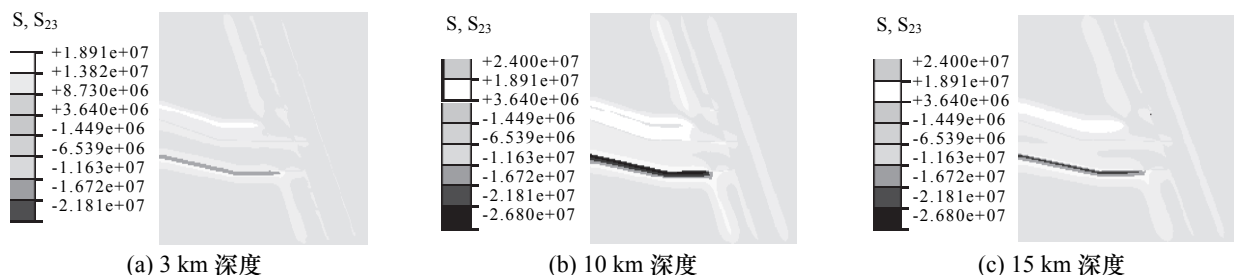


图11 剪应力  $S_{23}$  示意图(单位 Pa)

Fig.11 Diagrammatic sketch of shear stresses  $S_{23}$ (unit Pa)

### 3.3 库区表层塑性应变分布及分析

塑性应变分布在地表浅层 (2 km) 范围内, 第一、三塑性主应变集中在丹江破碎带沿线, 尤以北段更为集中, 同时在公路破碎带的东南段有轻度的塑性应变区。从塑性应变图和丹江口库区的地震分布情况推断: 库区的大小诱发地震并不仅仅与库区的塑性应变有关, 一般诱发地震的发生还要具备以下条件: 要有特定的应力场背景, 发震前就应该具备发震的临界应力条件; 在水库本身或附近要有大的活动性断裂带存在, 在局部应力作用下断裂带可以发生应力集中, 同时, 库水可以沿断裂带向深处渗漏; 岩石临界破坏状

态的形成,这一般取决于水库水位的升降(图12)。

## 4 结论

(1) 水库二期蓄水后库水静压力与地应力的耦合作用在以下浅层拉应力区域可能会因为受拉破坏引发一系列微震:沿公路断裂带沿线以南地区、丹江断裂带以东地区、均陨断裂带以北和丹江断裂带以西地区;

(2) 水库二期蓄水后水体的重力作用使宋湾、

林茂山以及丹库的外围形成张拉区,同时这些地区以透水性较好的碳酸盐岩为主有利于库水的下渗,从而会引起这些地区特别是有断裂存在的地方可能会诱发一些小震;

(3) 根据计算的库区水平剪应力分布以及地质构造和库区地震分布情况推测田川、仓房地区随着二期蓄水后库水的渗透可能会因为水平剪切滑移诱发一系列的小震;光化、谷城、石化街地区和丹江断裂带的东南段可能在二期蓄水后诱发一系列的微震;

(4) 根据计算的库区的竖向剪应力分布和构造断裂分布推测二期蓄水后沿老均县南北一线、保康—远安一线、襄阳—钟祥一线和郧县—习家店可能会因为竖向剪应力达到临界值而诱发一系列的小震;沿公路破碎带沿线二期蓄水后会诱发一系列的微震;

(5) 5~10 km 深度处,断裂带与完整岩石交界处是最大剪应力集中区,也是竖直主压应力突变区,这与本区的震源深度大多在 5~10 km 相吻合<sup>[4]</sup>,所以推断本区的诱发地震大多是断裂带上的剪应力达到临界值所致。

## 参考文献 References

- [1] 易立新, 车用太, 王广才. 水库诱发地震研究的历史、现状和发展趋势[J]. 华南地震, 2003, 23(1):28-37.  
YI Lixin, CHE Yongtai, WANG Guangtai. Retrospection and prospect of the research on reservoir induced seismicity[J]. South China Journal of Seismology, 2003, 23(1):28-37.
- [2] 荣建东, 耿爱玲. 丹江口水库地震观测 30 年[J]. 地壳形变与地震, 1997, 17(4):83-88.  
RONG Jiandong, GENG Ailing. Earthquake observation 30 years of Danjiangkou reservoir[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1997, 17(4):83-88.
- [3] 李珏, 刘行松. 均陨断裂带和丹江断裂带的研究并论丹江口地区几个地震地质问题[C]//丹江口水库诱发地震文集. 北京:地震出版社, 1980: 22-24.  
LI Ping, LIU Xingsong. Research of Junyun fracture zone and Danjiang fracture zone and discussion of seismic and geologic questions in the area of Danjiangkou reservoir[C]//Anthology of Danjiangkou reservoir induced earthquake. Beijing: Earthquake Press, 1980: 22-24.
- [4] 高锡铭. 汉江丹江口水库的地震活动[C]//丹江口水库诱发地震文集. 北京:地震出版社, 1980: 80-89.  
GAO Ximing. Seismic activity of Hanjiang and Danjiangkou reservoir[C]//Anthology of Danjiangkou reservoir induced earthquake. Beijing: Earthquake Press, 1980: 80-89.
- [5] 严尊国, 薛军蓉, 耿爱玲. 丹江口水库及邻区地震震源参数的研究[J]. 华南地震, 1994, 14(3):24-32.  
YAN Zunguo, XUE Junrong, GENG Ailing. Parameters research of earthquake focus in the area and neighbor area of Danjiangkou reservoir[J]. South china journal of seismology, 1994, 14(3):24-32.
- [6] 黄乃安, 张绍波. 丹江口水库诱发地震趋势研究[J]. 华南地震, 1991, 11(4):67-74.  
HUANG Naian, ZHANG Shaobo. Trend research of Danjiangkou reservoir induced earthquake[J]. South China Journal of Seismology, 1991, 11(4):67-74.
- [7] CHEN Linyue, TALWANI Pradeep. Reservoir-induced Seismicity in China[J]. Pure and applied geophysics, 153(1998):133-149.
- [8] MATCHARASHVILI T, CHELIDZE T. Increase of order in seismic processes around large reservoir induced by water level periodic variation[J]. Nonlinear Dynamics, 2008, 51(3):399-407.
- [9] ABAS Kangi, NEMATOLLAH Heidari. Reservoir-induced seismicity in Karun III dam(southwestern Iran)[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(4):519-527.
- [10] 刘素梅, 徐礼华. 丹江口水库区构造应力场的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23):4017-4021.  
LIU Sumei, XU Lihua. Numerical simulation of tectonic stress field at Danjiangkou reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23):4017-4021.
- [11] 刘素梅, 徐礼华. 丹江口库区水压应力场的有限元模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(7):863-869.  
LIU Sumei, XU Lihua. Finite-element simulation of hydraulic-pressure stress field in Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 36(7):863-869.
- [12] 谢向东, 徐礼华, 李彦强. 丹江口库区初始地应力场的反演[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2012, 44(2): 217-224.  
XIE Xiangdong, XU Lihua, LI Yanqiang. Derivation of the initial crustal stress field in the Danjiangkou reservoir area[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2012, 44(2):217-224.

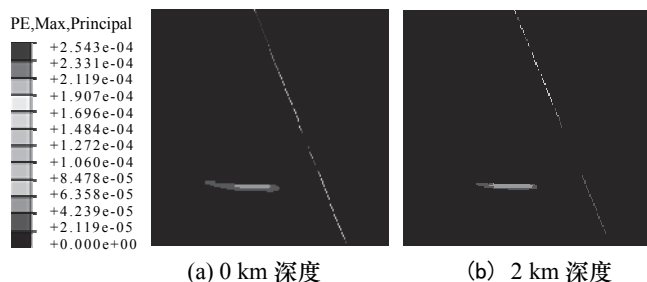


图12 第一塑性主应变示意图  
Fig.12 Diagram sketch of first plastic principal strain

## Coupling numerical simulation of the in-situ stress and hydraulic-pressure fields in Danjiangkou area using the modeling with the zone of chasm and fault

XIE Xiangdong<sup>1</sup>, LIU Sumei<sup>2</sup>

( 1. School of Mechanics and Automobile Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China )

**Abstract:** The 3-D finite element model considering the zone of chasm and fault is established according to seismogeological characteristics of Danjiangkou area by the software of ABAQUS. The stress and strain fields of the model are calculated reversely in the condition of interaction of the in-situ stress and the second impoundment water pressure fields, the stability of reservoir area is analyzed, the possibility and risk area of induced seismic is forecasted. The results show that after the second impoundment a series of microseisms would be tempted by stretch in such tensile stress areas as the south of Gonglu chasm, the east of Danjiang chasm, the north of Junyun chasm and the west of Danjiang chasm, be tempted by shear-slide in such areas as Guanghua, Gucheng, Shihuaie, the southeast of Danjiang chasm, in the line of Gonglu chasm; A series of small earthquakes were tempted by reservoir-water infiltration and shear-slide in such area as the periphery of Songwan, the periphery of Linmaoshan, the periphery of Danku, be tempted by shear-slide in the line of Baokang and Yuan'an, the line of Xiangyang and Zhongxiang, the line of Yunxian and Xijiadian.

**Key words:** hydraulic-pressure stress field; in-situ stress field; reservoir induced earthquake; Danjiangkou Reservoir

( 本文编辑 桂智刚 )

---

( 上接第522页 )

## Research on the seismic damage model and damage evaluation of RC core walls

HOU Piji<sup>1</sup>, ZHENG Shansuo<sup>2</sup>, SU Sanqing<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China,;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. and Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** RC core walls is a widely used structural unit in high-rise hybrid structure. In order to study the multi-scale effect of migration and transformation from member damage to structure damage, based on numerical method, the storey damage model was established by introducing energy weighting coefficient of members. Through analysis the relation between storey damage and structure damage, the global damage model, which could reflect migration and evolution law from member damage to local damage and global damage, was established by using the storey weighting coefficient is a combination of location weighting coefficient and storey damage weighting coefficient. The damage states and corresponding damage index range of RC core walls were defined by combining the damage indexes. Comparison of the calculated results with test results indicates that the proposed seismic damage model can appropriately describe the damage evolution of RC core walls, and the relationship between the local component damage and global structure damage is revealed. The results may well serve as a reference on seismic performance evaluation for hybrid structure.

**Key words:** RC core walls; damage model; damage analysis; numerical simulation; damage states

( 本文编辑 吴海西 )