

# 基于微震的溪洛渡拱坝右岸变形规律探究

黄海龙<sup>1</sup>, 张绍成<sup>2</sup>, 沙椿<sup>3</sup>, 何刚<sup>3</sup>

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司, 成都 610041;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072;

3. 四川中水成勘院工程物探检测有限公司, 成都 610072)

**摘要:** 随着我国对水资源的大力开发, 大批水电站正在建设, 其中一部分已经投入使用, 这些水电站都伴随着高陡的岩质边坡, 使得边坡的稳定性问题尤为突出, 因此对蓄水期岩质高边坡的变形破坏特征以及稳定性问题的分析研究就变得非常重要。笔者通过对溪洛渡水电站蓄水期右岸边坡进行微震监测和数值模拟计算, 揭示了右岸边坡深部岩体的微震事件所处岩层, 分析研究了右岸边坡应力和位移与蓄水位的关系特征, 在蓄水加载过程及泄水卸载过程中, 微震事件均主要分布在上游围堰至下游二道坝之间右岸坝基下方深部阳新灰岩层中, 玄武岩地层中分布较少, 判断溪洛渡水电站大坝坝基在蓄水过程中出现局部岩体应力集中和应力迁移现象。

**关键词:** 岩质高陡边坡; 边坡稳定性; 微震监测; 数值模拟

**中图分类号:** TV223.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.10

## 0 引言

目前, 水能是我国利用的最高新能源之一。自20世纪80年代以来, 我国已经成为了世界上水电资源开发和土木工程建设规模最大的国家。近些年来, 我国为了改变水电开发量占技术经济可开发量的比例, 充分利用我国丰富的水资源, 开始大力修建大型水利水电工程<sup>[1]</sup>, 溪洛渡、向家坝、二滩小湾和锦屏一级水电站都已投入发电<sup>[2]</sup>。随着大型水电站的使用, 出现了岩质高边坡的稳定性问题<sup>[3]</sup>。岩质高边坡<sup>[4]</sup>既是工程建筑物的基本环境, 也是工程设施的承载体, 因此工程建设时会打破边坡原有的平衡状态, 如果控制或管理不当, 就会带来边坡稳定性问题, 形成边坡地质灾害; 同时工程荷载影响改变了它的承载条件和承载环境, 也影响了稳定性<sup>[5]</sup>。岩质边坡稳定性问题的研究已经成为了我国21世

纪岩土工程领域的热点问题, 同时也是科学和工程技术难点问题。

溪洛渡水电站<sup>[6]</sup>是金沙江干流攀枝花至宜宾河段梯级开发规划中的第三个梯级电站。工程枢纽区位于四川省雷波县(左岸)和云南省永善县(右岸)接壤的溪洛渡峡谷, 距两县城距离分别为20 km和7 km。电站主要用来发电, 也有着防洪、拦沙及改善下游航运的综合功能。溪洛渡水电站水工布置三维图见图1, 拱坝为双曲拱坝, 坝高278 m, 正常蓄水600 m, 坝段控制流域面积454 400 km<sup>2</sup> (占金沙江的96%), 多年平均流量为4 570 m<sup>3</sup>/s。溪洛渡水电站是目前中国第二、世界第三的水电站, 作为长江防洪体系的重要组成部分, 是解决川内防洪问题的主要工程措施之一。因此笔者选择研究分析溪洛渡水电站两岸边坡的稳定性问题, 对实际工程具有代表性的参考意义。

笔者将以溪洛渡水电站右岸边坡为研究对象,

采用现场调研、现场监测、地质构造分析研究、数值模拟等研究方法,对溪洛渡水电站蓄水期右岸边坡的稳定性进行了分析研究和评价。通过对具体项目进行分析研究,不仅仅是解决了实际对象的工程安全问题,也为岩质高边坡在蓄水期的稳定性分析提供了新的思路和方法,并尝试建立了对岩质高边坡基于微震监测技术<sup>[7]</sup>和数值模拟相结合的边坡失稳预测的新方法。

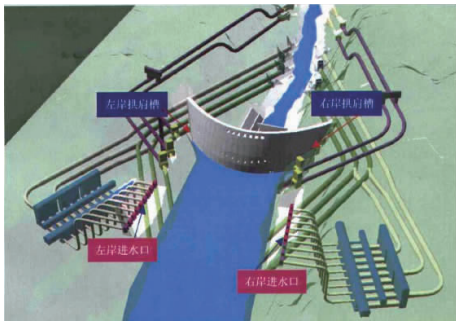


图1 溪洛渡水电站水工布置三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of hydraulic layout of Xiluodu hydropower station

## 1 区域地质背景

### 1.1 坝区地形地貌

溪洛渡坝区位于豆沙溪沟口至溪洛渡沟口全长约 4 km 的溪洛渡峡谷段,金沙江在豆沙溪沟口呈近 90° 拐弯,以 S50°~60°E 流经坝区。坝址区河道顺直,谷坡陡峻,临江坡高 430 m~300 m。枯水期水位 370 m,对应江面宽 70 m~110 m,420 m 高程谷宽 200 m~280 m,蓄水位 600 m 时相应谷宽 500 m~535 m。河谷断面呈较对称的“U”型,谷底较宽阔平缓,两岸山体陡峻雄厚。坝区除上游豆沙溪沟、下游溪洛渡沟切割以外,峡谷地形完整,无沟谷切割。一般两岸 420 m 高程以下总体呈 25°~40° 的缓坡,左岸 420~560 m 段为 70°~75° 的陡壁,560 m~600 m 段为 50° 左右的斜坡,600 m 以上为 70°~80° 的陡壁。右岸 420 m~570 m 为 55°~70° 的陡坡,570 m~630 m 段为 40° 左右的斜坡,630 m 以上为 70°~80° 的陡壁。两岸谷肩高程 680 m~860 m 以上为第四纪堆积缓坡平台,地形宽阔平缓,缓倾下游。

### 1.2 地层岩性

溪洛渡坝区河床基岩及两岸谷坡主要由二叠系上统峨眉山玄武岩(P2β)组成,二叠系下统茅口组

石灰岩(P1m)仅出露于峡谷进口段河床谷底,向下倾伏于玄武岩之下,两岸谷肩残留厚约 2 m~15 m 的二叠系上统宣威组砂页岩(P2x)。在玄武岩底部有一层湖沼相的泥页岩沉积层(P2βn),假整合于茅口组石灰岩之上。第四系不同成因的松散堆积物不整合于上述基岩之上。

### 1.3 地质构造

坝区位于雷波—永善构造盆地中的永盛向斜之西翼,系一总体倾向南东的似层状玄武岩组成的单斜构造,缓倾下游偏左岸。顺河方向上在坝址上游电站进水口附近和下游尾水洞出口附近地层产状有两处轴向近 EW 的明显转折,形成“陡~缓~陡”的平缓褶曲。坝址位于峡谷中部产状平缓段。该段两岸走向变化较大,左岸总体为 N20°~40°W/NE∠4°~7°;右岸 N15°~30°E/SE∠3°~5°。玄武岩中主要结构面为层间、层内错动带和节理裂隙。

## 2 微震监测概况

微震监测技术用于监测岩体在变形和断裂破坏过程中以微弱地震波的形式发生的微震事件,利用现代计算技术、通讯技术、GPS 授时精确定位技术,在三维空间中实时地确定岩体中微震事件发生的位置和量级,从而对岩体的变形活动范围及其稳定性做出安全评价。

声发射(微震)<sup>[8]</sup>的出现要具备两个条件:第一,材料要受外载作用;第二,材料内部结构不均匀或有缺陷。秦四清<sup>[9]</sup>等人对声发射产生的机理进行了分析,如图 2 所示。基于上述机理,对于材料的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展,就可以利用声发射来提供它们的动态信息。声发射源往往是材料灾难性破坏的发源地。由于声发射的活动往往在材料

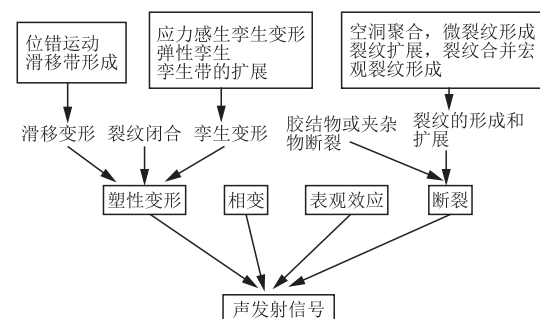


图2 声发射(微震)信号产生机理

Fig. 2 Generation mechanism of acoustic emission (microseismic) signals

破坏之间很早就会出现,因此根据这些声发射的特点及其发射的强度,不仅可以推知声发射源的目前状态,而且可以知道它形成的历史,预报其发展趋势,从而进行状态监测和故障诊断。

### 3 右岸边坡微震活动性规律及其演化机理

自 2019 年 7 月 19 日开始,溪洛渡水电站右岸

边坡岩体微震监测系统全天候的数据采集和分析,实时监测右岸边坡岩体微震信号。截至 2020 年 12 月 31 日,经过校核,微震监测系统共监测到有效岩石微破裂事件 1 115 个。在此期间,溪洛渡库区经历两次加载以及一次卸载,目前处于第二次加载阶段后期,库区水位开始逐渐下降。图 3 为目前监测期间的微震事件整体空间分布情况。微震事件的能量震级范围大部分集中在  $-1.2 \sim 0.4$  之间,呈均匀分布,如图 4 所示,微震事件空间聚类分布规律如图 5 所示,可以看出,聚类距离一般为 180 m 左右。

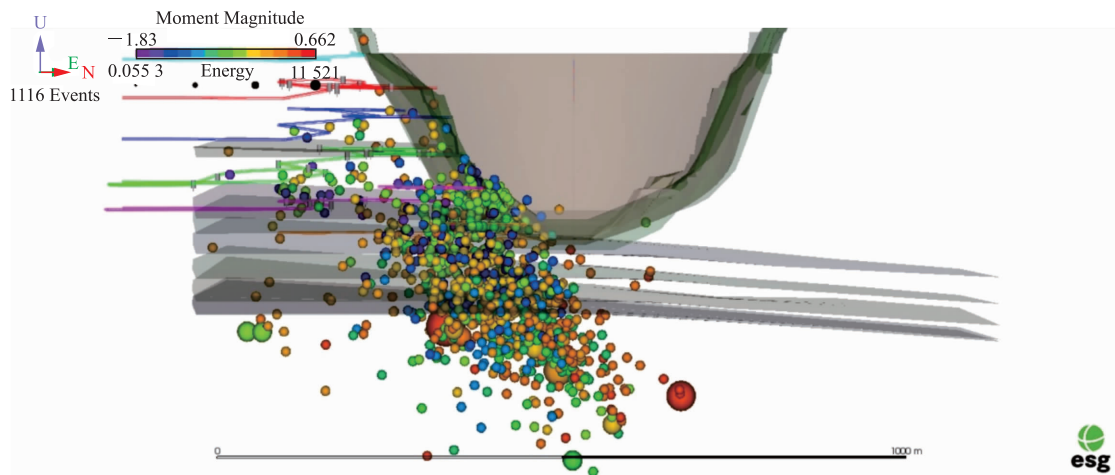


图 3 微震事件空间分布形态

Fig. 3 Spatial distribution patterns of microseismic events

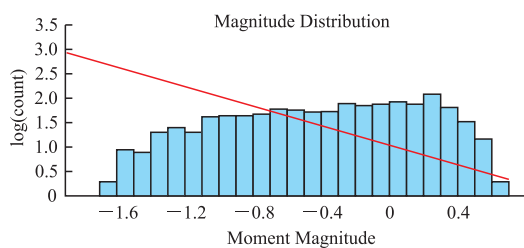


图 4 微震事件矩震级分布图

Fig. 4 Microseismic event moment magnitude distribution

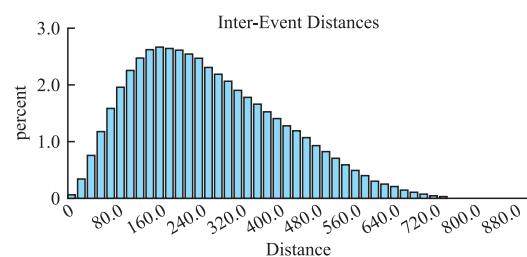


图 5 微震事件距离的聚类分布图

Fig. 5 Cluster distribution diagram of microseismic event distance

#### 3.1 微震事件时间分布规律

通过对监测初期溪洛渡水电站右岸边坡岩体微震活动性与时间关系分析,监测期微震活动性与坝前库水位具有明显的正相关关系。2019 年 7 月 19 日至 2020 年 12 月 31 日,单日微震活动性与蓄水位关系如图 6 所示。

由图 6 可知,在低水位时期,右岸边坡岩体微震活动性低,这一阶段水位升降对于微震活动性并无明显影响。随着库区水位的不断上升,微震事件显

著增加,在此间的两次加载阶段,均存在同样的变化规律,这说明了微震活动性对蓄水位上升具有极大的敏感性;同时当库水位达到正常蓄水位后进入高水位调控期时,库水位保持相对稳定,此时微震活动性逐渐降低,但在此期间水位稍微上升,也会引起微震事件显著增加。

分析对比这两次库区蓄水加载过程中的微震活动性情况。2019 年 9 月 4 日至 2019 年 11 月 20 日共发生微震事件 335 个,2020 年 6 月 25 日至

2020年11月18日共发生微震事件378个。两次加载过程中所产生的微震事件数量相差不大,微

震活动性规律一致,微震活动性与库区水位升降呈正相关性。

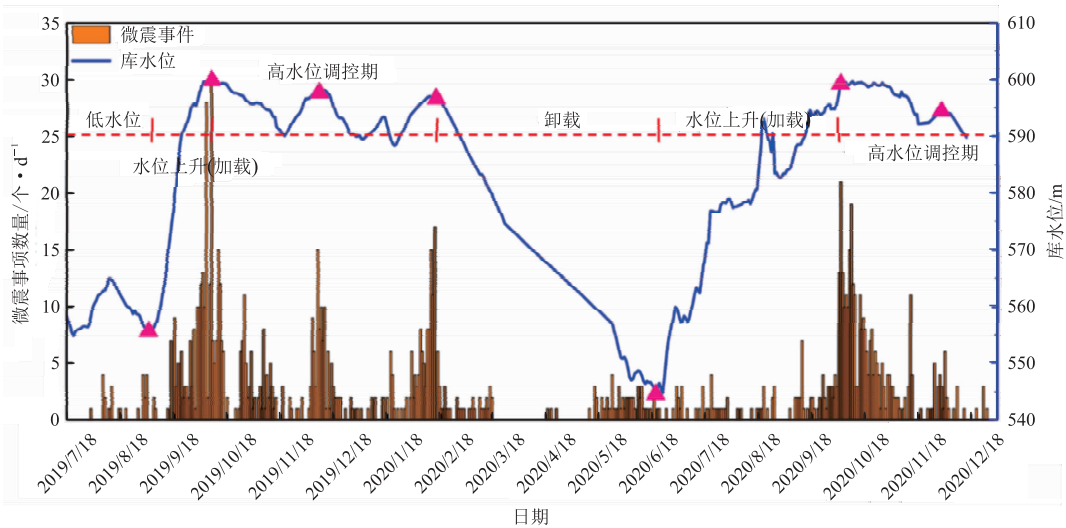


图6 溪洛渡水电站单日微震活动性与蓄水位关系

Fig. 6 Relationship between daily microseismicity and storage level of Xiluodu hydropower station

### 3.2 微震事件空间分布规律

图7为监测期内低水位时期右岸边坡微震事件分布图。由图4~图7可知:水位在555 m高程上下浮动,微震活动性较低,微震事件数量较少,主要分布在上游阳新灰岩层(大致263 m高程以下),下游右岸抗力体排水洞325 m~423 m高程(P2 $\beta$ 4~P2 $\beta$ 6岩流层)也有少量事件分布,但都未形成聚集区域。

图8在监测内的第一次加载阶段右岸边坡微震事件分布图。由图8可知:上游微震事件主要发生在右岸边坡阳新灰岩层中,下游震级较大、能量较大的微震事件主要分布在阳新灰岩层,而能量小,震级较小的微震事件主要分布右岸抗力体排水洞周围岩体内部(P2 $\beta$ 1~P2 $\beta$ 6岩流层)。

由图9、图10可知:水位下降阶段(水位从599 m高程降至590 m高程),微震事件持续增加,但微震活动性逐渐降低,单日微震事件数量逐日减小,此时上游微震事件在P2 $\beta$ 6岩流层至阳新灰岩层均有分布,但震级较大、能量较大的微震事件同样主要分布在阳新灰岩层中,下游微震事件分布较为分散,在右岸抗力体排水洞周围(P2 $\beta$ 1~P2 $\beta$ 5岩流层)均有分布,震级较小,震级较大的微震事件同样大多分布于阳新灰岩层;水位重新上升阶段(水位从590 m高程上升至598 m高程),微震活动性随着水位再次升高而明显增加,整体上单日微震事件数量逐日增加,上游微震事件数量减少,大多数微震事件在下游

右岸抗力体排水洞周围产生,从P2 $\beta$ 5岩流层至阳新灰岩层均有分布,但无明显聚集现象,大部分微震事件发生在阳新灰岩层中。

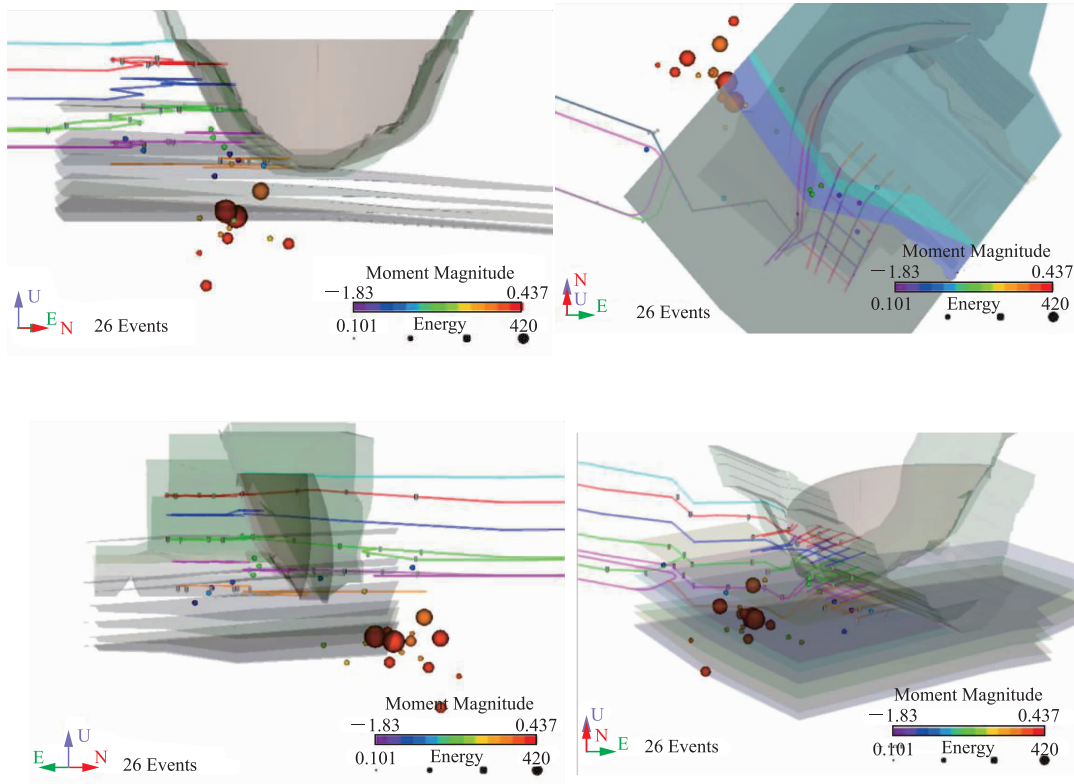
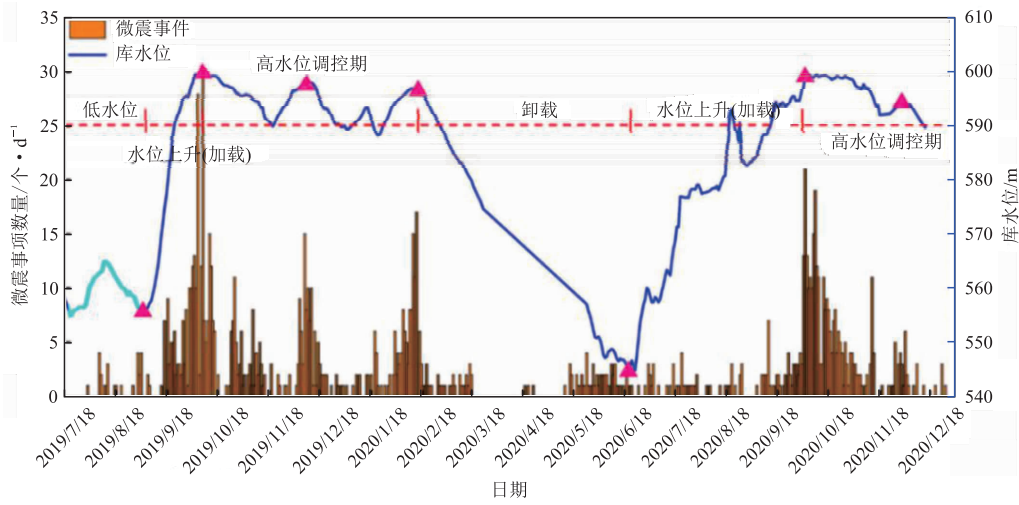
监测期间,受坝前库水位的影响,微震事件数量随着蓄水位上升而显著增加,微震活动性与蓄水位有着明显的相关性。微震事件主要分布在右岸抗力体排水洞下方及上游围堰至二道坝之间坝基下方深部岩体区域(主要在阳新灰岩层)。

## 4 ANSYS数值模拟分析

### 4.1 模型建立

根据溪洛渡拱坝的一些参数,在CAD软件中建立出来该双曲拱坝,创建拱坝时运用到的一些参数如表1所示,在ANSYS中创建出来的双曲拱坝如图11所示。

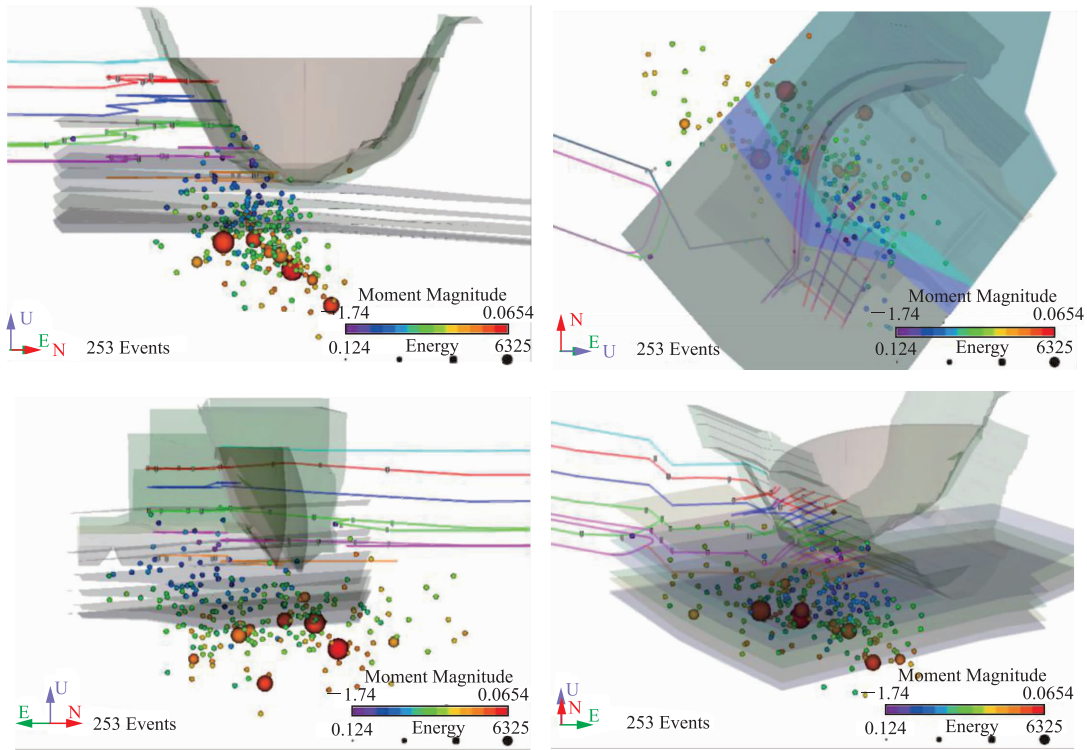
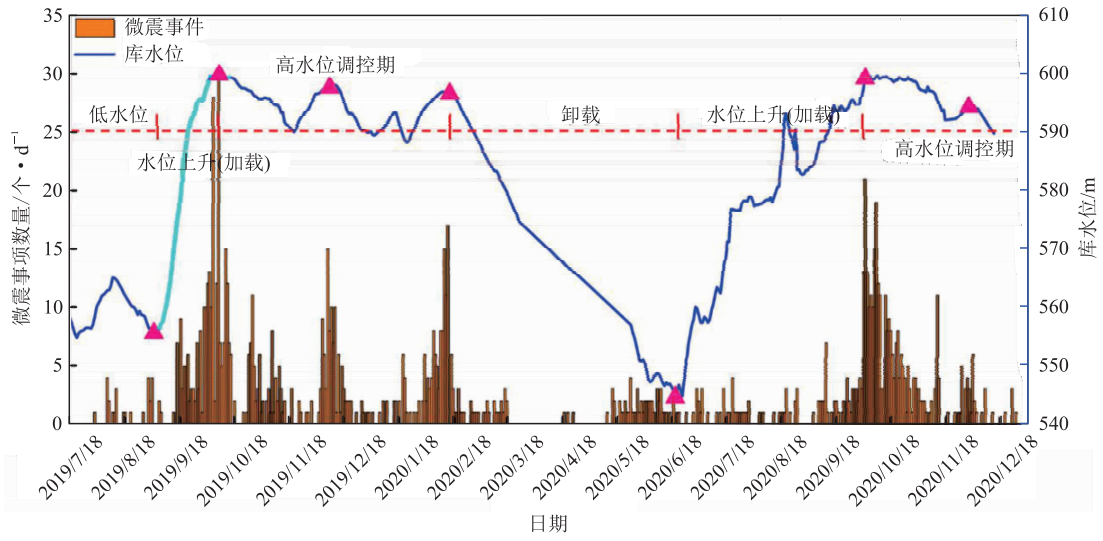
溪洛渡大坝边坡的创建,是直接在ANSYS软件中以拱坝为中心点向两侧和四周拉伸,绘制出的左右两岸边坡与拱坝黏合在一起,从而使得拉伸出的边坡即保证了符合实际情况,又很规则,减少后期进行网格划分时出现一些不必要的错误。左右两岸边坡根据实际边坡情况各拉伸了15层,边坡与拱坝的连接部位与实际情况出入不大,从而可以进行真实的模拟,使得后期计算结果更有说服力。所拉伸出的左右两岸最终模型如图12所示。



水位:555 m~560 m,时段:2019.7.19—2019.9.3

图7 低水位时期右岸边坡微震事件分布图

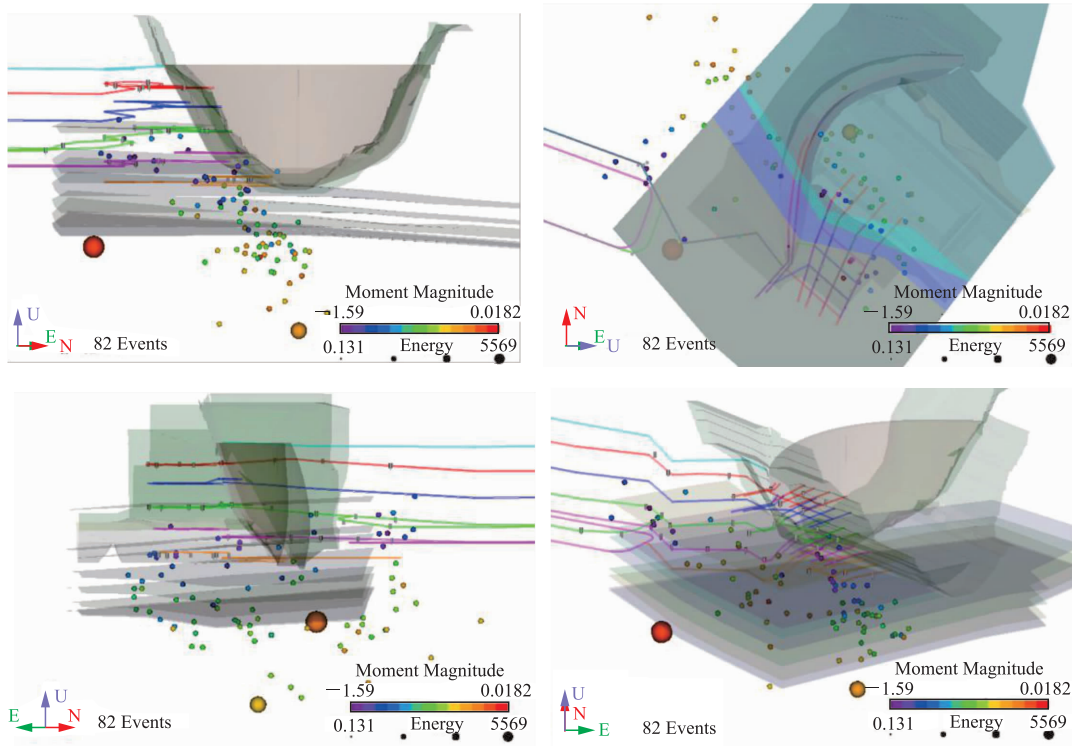
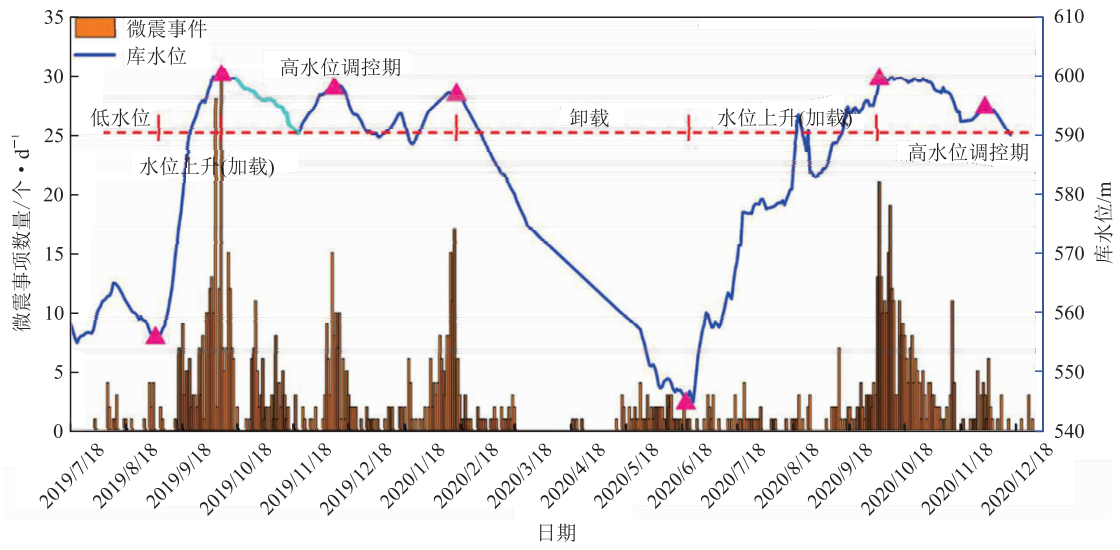
Fig.7 Distribution of microseismic events on the right bank slope during low water level



监测期内第一次加载,水位:555 m~600 m,时段:2019. 9. 4—2019. 10. 16

图 8 水位上升右岸边坡微震事件分布图

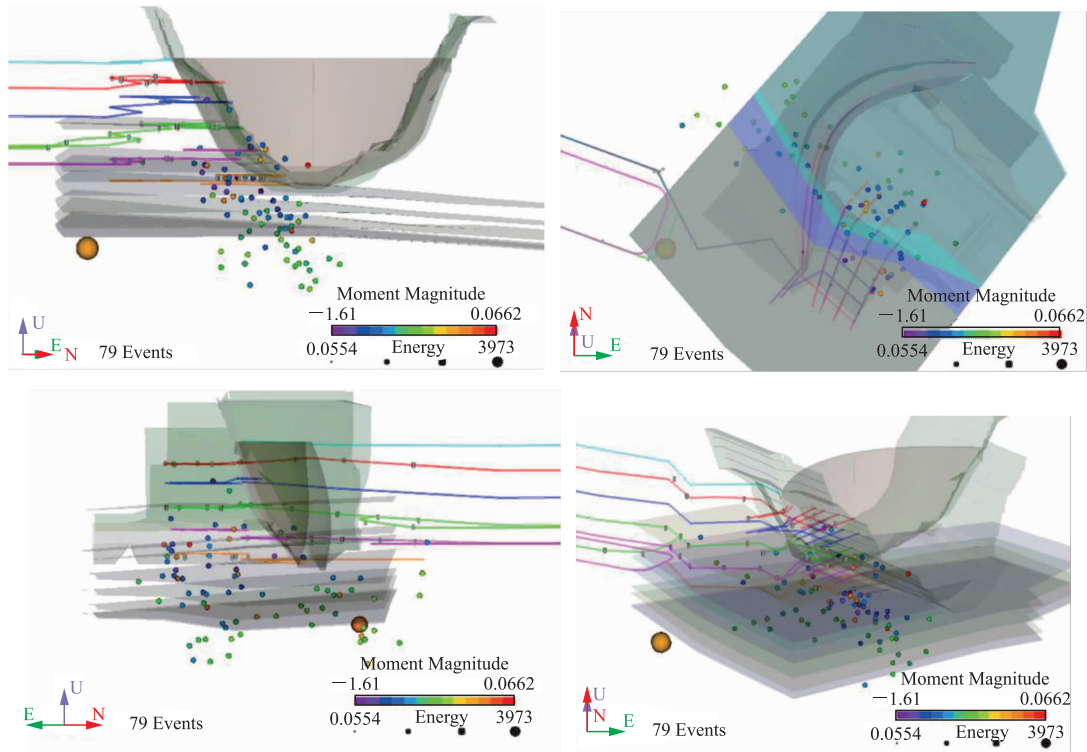
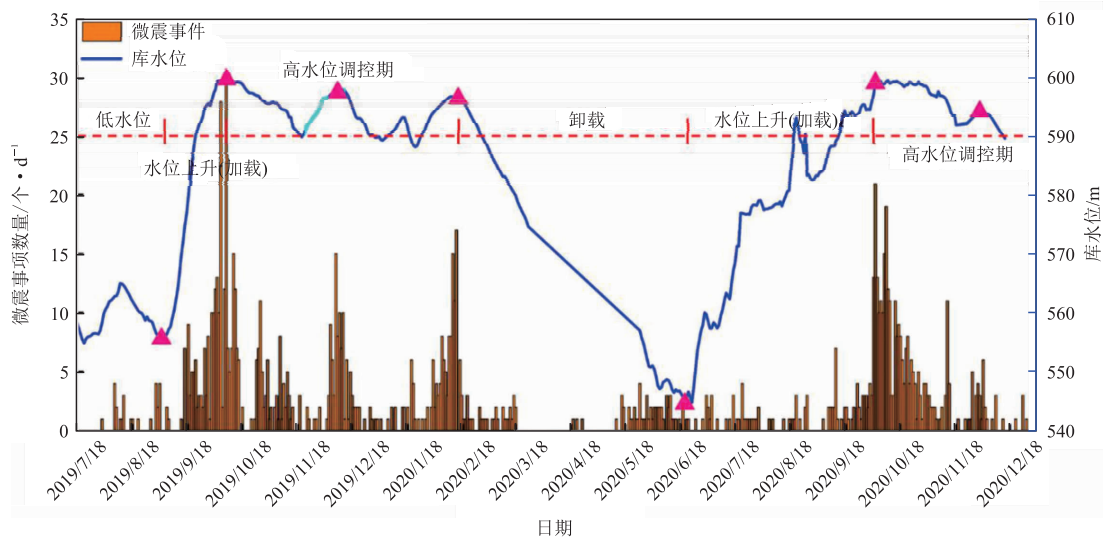
Fig. 8 Distribution of microseismic events on the right bank slope with rising water level



水位:600 m~590 m,时段:2019. 10. 17—2019. 11. 20,水位降

图 9 高水位调控期 I 右岸边坡微震事件分布图

Fig. 9 Distribution of microseismic events on the right bank slope during the period of high water level regulation



水位:590 m~598 m,时段:2019.11.21—2019.12.13,水位重新上升

图 10 高水位调控期 II 右岸边坡微震事件分布图

Fig. 10 Distribution of microseismic events on the right bank slope during the high water level regulation period II

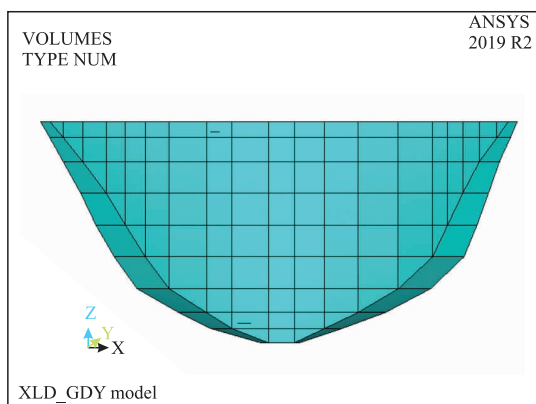


图 11 双曲拱坝图

Fig. 11 Diagram of hyperbolic arch dam

表 1 双曲拱坝的建模参数

Tab. 1 Modeling parameters of hyperbolic arch dam

项目	参数
坝高/m	278
拱冠顶厚/m	14
拱冠底厚/m	69
拱端最大厚度/m	75.7
顶拱中心角/°	93.54
最大中心角/°	96.21
顶拱中心线弧长/m	698.07
厚高比	0.248
弧高比	2.512
上游倒悬度	0.217
单位坝高柔度系数	10.68

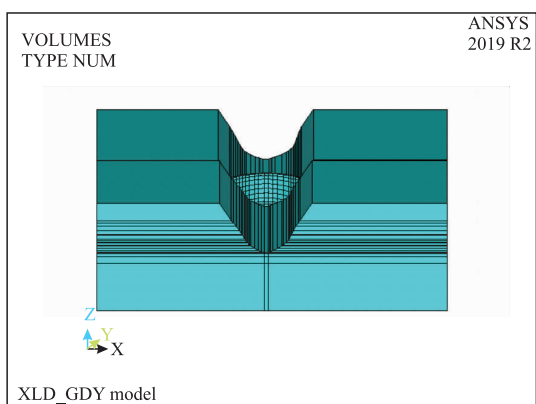


图 12 左右两岸边坡侧视图

Fig. 12 Side view of slope on left and right banks

本模型是采用 3D 六面体对其进行网格划分,对不同体的线段采用十等分划分并划分网格。采用 8 节点等参单元将计算模型共离散为 300 000 个单

元,345 587 个节点。对数值模型中拱坝、左、右岸边坡和不同的层间错综带分别进行了参数的赋予。为了充分研究溪洛渡拱坝全局应力应变的分布及其演化,根据现场实际情况确定了如下两种工况:工况一:坝前水位 600 m;工况二:坝前水位 590 m。

#### 4.2 边坡及坝体模拟分析

工况一:2013 年下闸蓄水至今,上游水位从 441.25 m 抬升。2014 年水位第一次蓄水至 600 m,在后期运行期间,溪洛渡水电站多次由低水位上升至正常蓄水位,对拱坝蓄水位 600 m 进行数值仿真模拟,其模拟结果的应力分布如下图 13 所示。

通过数值模拟模拟出来的上下游 X、Y、Z 方向的应力分布情况(图 13)可以看出,上下游各个方向的应力分布都是呈对称分布。在 X 方向上,由于水的渗流渗透作用,导致两岸岸坡岩体向中间收缩聚拢,从而挤压河道,使得最大应力达到 10.7 MPa,出现在河道下方,这与实际趋势相符合,并且应力在 Y、Z 方向上同样存在这样的规律。从 Y 方向应力图可以看到,因为 Y 方向是指向上游的方向,所以 Y 方向的应力总体应力都比 X 和 Z 方向的小一些,这也与实际规律相符合。应力在 Z 方向上的分布呈现层状分布,从地层表面到底部应力逐渐增大,底部应力最大,因为此时整个数值模型同时受到自身重力和水压作用,所以应力分布呈现这个状态,这符合实际规律。从 X、Y、Z 方向的应力分布图可以看出,大应力区基本都存在于右岸边坡阳新灰岩层中,这与第三节中微震事件空间分布规律所得到的微震事件分布图相吻合,水位在 555 m~600 m 时,上游微震事件主要发生在右岸边坡阳新灰岩层中。

工况二:选择对水位 590 m 进行数值模拟,因为在第四章中,通过微震监测表明,在蓄水位 590 m~600 m 的涨消过程中,微震事件的变化相对比较显著,为了分析其具体的应力场与位移场分布,所以选择了 590 m 蓄水位进行数值模拟计算,并于工况一进行比较分析。其应力的数值模拟结果如图 14 所示。

图 14 是在 590 m 蓄水位时通过数值模拟得出的数值模型在 X、Y、Z 方向上的应力分布图,从图中可以看出,在三个方向上,总体的应力分布特征是数值模型中间位置处应力要大一些,因为水的渗流作用在河道处要比对两侧作用大一些,并且应力分布呈层状分布形态,从数值模型的上表面,也就是地层表面向下部逐渐增加,符合实际规律。

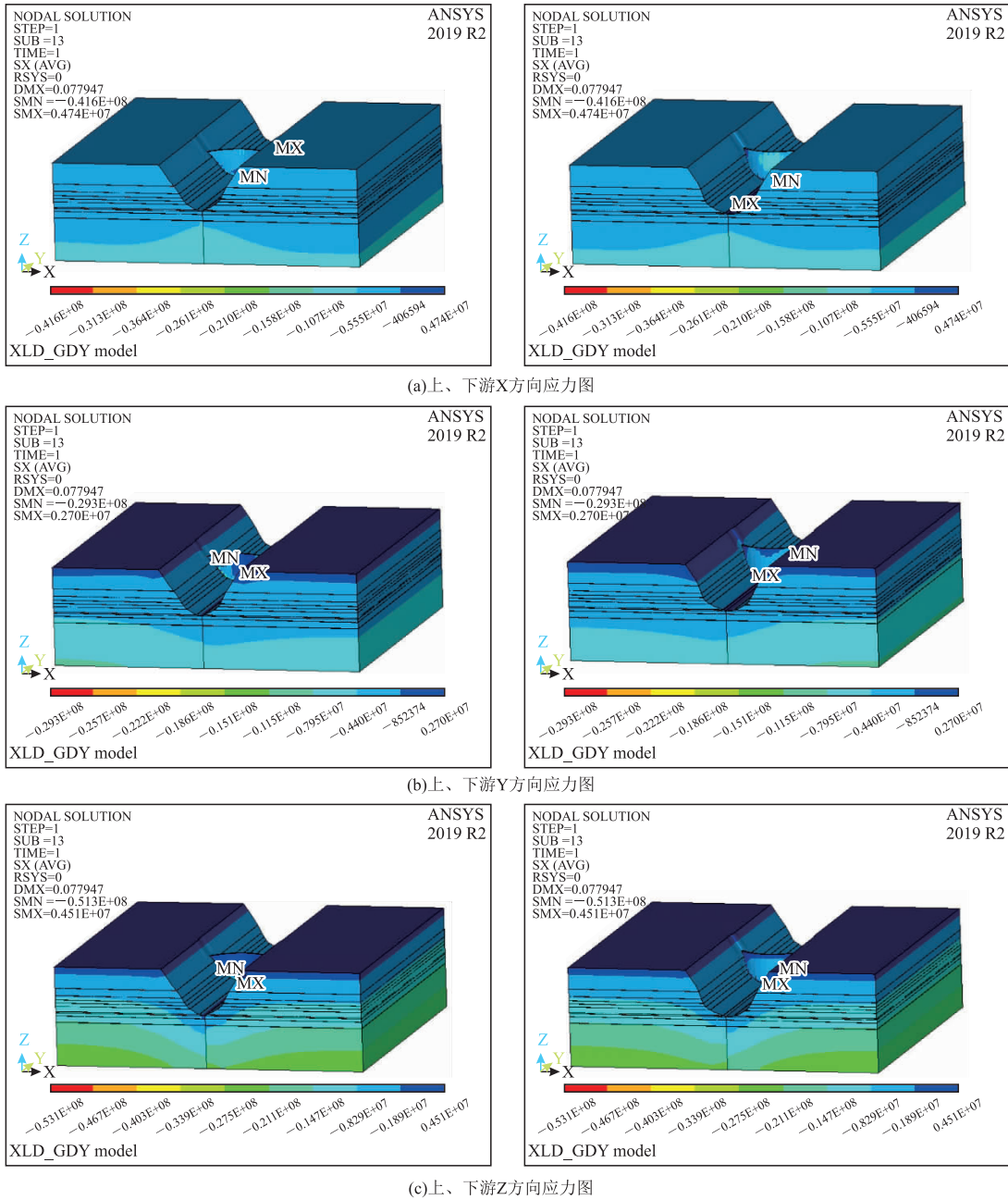


图 13 正常蓄水位(600 m)应力图

Fig. 13 Stress diagram of normal storage level (600 m)

从图 14(a)上、下游在 X 方向上的应力图可以看出,数值模型的中间位置应力为最大,因为水的渗流作用,导致两岸边坡向中间发生收缩聚拢变形,从而挤压河道,因此呈现出如图所示的应力分布特征,与图 13 在 600 m 蓄水位下数值模型在 X 方向应力图相比较,可以看出大应力区的范围从底部向上部扩大了一些,这部分应力主要分布在 P236 岩流层至阳新灰岩层中,但是应力的大小相比工况一计算

得出的应力的要小一些,这是因为水位的降低导致相对作用小了一些,这与第四章通过微震监测得出的结论,水位下降阶段(水位从 599 m 高程降至 590 m 高程),微震事件持续增加,但微震活动性逐渐降低向吻合,符合实际规律。从图 14(b)上、下游 Y 方向的应力图可以看出,数值模型整体在 Y 方向上所受应力比另外两个方向要小一些,因为在 Y 方向上水的水平向对数值模型的作用相对较小,符

合实际规律。从图 14(c)上、下游 Z 方向应力图可以看出,应力呈现层状分布,并且从底层表面向底部逐渐增加,在底部的应力值达到了最大,因为在 Z

方向上,数值模型同时受到水的渗透作用和自身重力的作用,所以呈现出如图所示的应力分布特征。

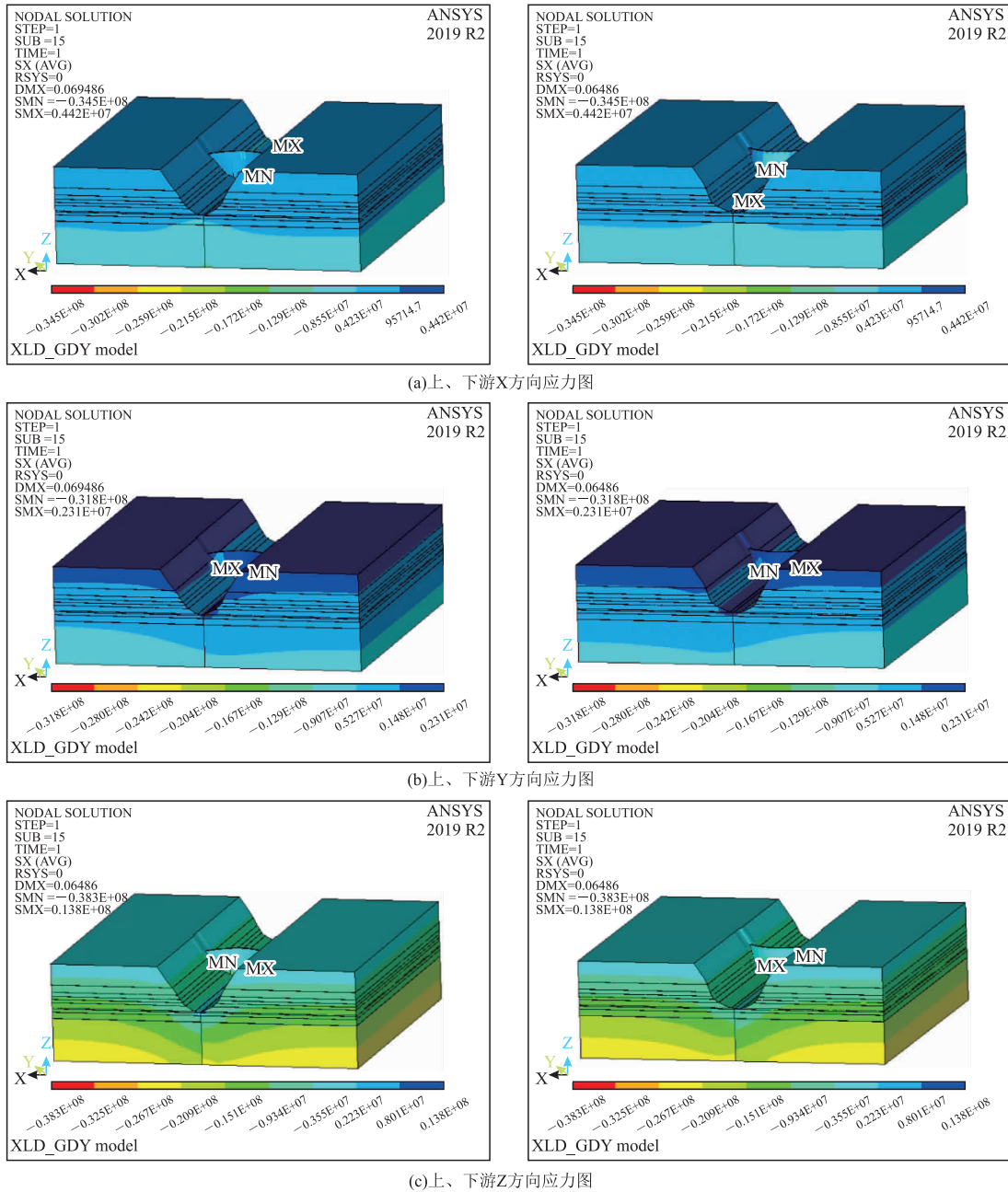


图 14 蓄水位 (590 m) 应力图

Fig. 14 Stress diagram of water level (590 m)

通过两种工况的数值模拟结果分析可得出,在同一蓄水位下拱坝的不同高度上,应力表现出在偏向坝轴线中心的位置应力最大,且向两边逐渐减小,在不同蓄水位下拱坝的相同高度上,节点所受应力表现出蓄水位越高,节点所受应力越大,应力与蓄水

位成正相关的关系。从工况一和工况二数值模拟得出的结果对比得出,工况一到工况二虽然蓄水位降低,但是工况二在 X 方向上的。

较大应力区域相比较工况一增大了一些,而工况二的应力值总体要小了一些,并且高应力在 P2β6

岩流层至阳新灰岩层均有分布,并主要分布在阳新灰岩层中,与震监测得出的结论相吻合,即水位下降阶段(水位从 599 m 高程降至 590 m 高程),微震事件持续增加,但微震活动性逐渐降低,单日微震事件数量逐日减小,溪洛渡右岸上游微震事件在 P2<sub>36</sub> 岩流层至阳新灰岩层均有分布,但震级较大、能量较大的微震事件同样主要分布在阳新灰岩层中,下游震级较大的微震事件同样大多分布于阳新灰岩层。通过微震监测结果与数值模拟结果进行对比分析,从而验证了微震事件的产生与转移是由高应力的产生与迁移所导致的。

## 5 结论

1)通过微震监测系统对溪洛渡水电站进行实时监测,检测结果发现右岸边坡蓄水加载过程及泄水卸载过程中,微震活动性均与库水位呈明显正相关性。上游库水处于低水位时,微震事件数量均极少,随着库水位上升的微震事件数量均呈显著增加,尤其是在高水位时期,水位升降与微震活动性的相关性更加明显。

2)蓄水加载过程及泄水卸载过程中,微震事件均主要分布在上游围堰至下游二道坝之间右岸坝基下方深部阳新灰岩层中,玄武岩地层中分布较少。主要微震变形区域在蓄水的各时期发生明显迁移现象,判断溪洛渡水电站大坝坝基在蓄水过程中出现局部岩体应力集中和应力迁移现象。

3)对溪洛渡水电站进行数值模拟计算,计算结果表明:在同一蓄水位下拱坝的不同高度上,应力表现为在偏向坝轴线中心的位置应力最大,且向两边逐渐减小;位移表现为在拱坝上游面的上端位移要大一些,且随着拱坝高度的降低,位移也逐渐减小。在不同蓄水位下拱坝的相同高度上,应力则表现为随着水位的升高,拱坝在相同高度上所受应力与蓄水位呈正比关系,且在坝轴线两侧应力最大,其应力要大于坝轴线位置处和拱坝的边缘,在拱坝边缘位置所受应力最小,这与实际工程情况相符合。将数值模拟的计算结果与微震监测结果相比较,发现其规律一致,表现为右岸边坡所受应力和位移与蓄水位呈正相关的关系,并且在高水位时相关性表现得比在低水位时更明显。

致谢:本次研究得到中国三峡集团公司科研经费的赞助(XLD/2170)。

## 参考文献:

- [1] 陆佑楣. 我国水电开发与可持续发展[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 1-4.  
LU Y M. Hydropower exploitation and sustainable development in China[J]. Water Power, 2005, 31(2): 1-4. (In Chinese)
- [2] 付成华,汪卫明,陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2305-2312.  
FU C H, WANG W M, CHEN S H. Back analysis study on initial geostress field of dam site for xiluodu hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2305-2312. (In Chinese)
- [3] 黄润秋,林峰,陈德基,等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227-232.  
HUANG R Q, LIN F, CHEN D J, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227-232. (In Chinese)
- [4] 张金龙,徐卫亚,金海元,等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1819-1827.  
ZHANG J L, XU W Y, JIN H Y, et al. Safety monitoring and stability analysis of large-scale and complicated high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1819-1827. (In Chinese)
- [5] 夏元友,李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1087-1091.  
XIA Y Y, LI M. Research and development trend of slope stability evaluation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1087-1091. (In Chinese)
- [6] 徐平,丁秀丽,全海,等. 溪洛渡水电站坝址区岩体蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊1): 220-222.  
XU P, DING X L, QUAN H, et al. Experimental study on creep characteristics of rock mass in dam site area of Xiluodu Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Suppl 1): 220-222. (In Chinese)
- [7] 姜福兴. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147-149.  
JIANG F X. Application of microseismic monitoring

- technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 147-149. (In Chinese)
- [8] 徐奴文, 唐春安, 沙椿, 等. 锦屏一级水电站左岸边坡微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 915-925.
- XU N W, TANG C A, SHA C, et al. Microseismic monitoring system establishment and its engineering applications to left bank slope of Jinping i hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 915-925. (In Chinese)
- [9] 李造鼎, 宋纳新, 秦四清. 应用岩石声发射凯塞效应测定地应力[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1994, 15(3): 248-252.
- LI Z D, SONG N X, QIN S Q. Determination of in situ stress by Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1994, 15(3): 248-252. (In Chinese)

### Study on deformation law of right bank of Xiluodu arch dam based on microseismic and numerical simulation

HUANG Hailong<sup>1</sup>, ZHANG Shaocheng<sup>2</sup>, SHA Chun<sup>3</sup>, HE Gang<sup>3</sup>

(1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;

3. Sichuan Hydropower Engineering Geophysical Exploration CO, LTD, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** With the vigorous development of water resources in China, a large number of hydropower stations are under construction or have been put into use. These hydropower stations are accompanied by high and steep rock slopes, making slope stability particularly prominent. Therefore, analyzing and studying the deformation and failure characteristics and stability of high rock slopes during impoundment is crucial. In this paper, the microseismic monitoring and numerical simulation of the right bank slope of Xiluodu Hydropower Station during the impoundment period are carried out. The rock strata where the microseismic events of the deep rock mass of the right bank slope are located are revealed. The relationship between the stress and displacement of the right bank slope and the water storage level is analyzed and studied. In water storage loading and discharge unloading, the microseismic events are mainly distributed in the deep Yangxin limestone strata below the right bank dam foundation between the upstream cofferdam and the downstream second dam, and the basalt strata are less distributed. It is judged that local rock mass stress concentration and stress migration occur in the dam foundation of Xiluodu Hydropower Station during impoundment.

**Keywords:** high and steep rock slope; slope stability; microseismic monitoring; numerical simulation