

# 大岗山水电站边坡抗剪岩-洞相互作用研究\*

邢亚子<sup>1</sup> 李连崇<sup>1</sup> 钟波波<sup>1</sup> 马克<sup>2</sup> 唐春安<sup>1</sup>

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116023; 2.中科院力学所,北京 100190)

**摘要:** 大岗山水电站右岸边坡地质条件复杂,地应力较高,发育有辉绿岩脉、中倾坡外的断层、卸荷裂隙密集带等不利组合体,边坡稳定性问题极为突出。将实际微震监测技术与有限差分数值软件FLAC<sup>3D</sup>结合,对抗剪洞加固前、后的边坡稳定性以及岩-洞两体的相互作用进行分析。指出边坡开挖过程中岩体空间损伤劣化的微震活动规律和可能发生坡体失稳的潜在滑动面位置。研究发现抗剪洞起到了很好的加固作用,加固后潜在滑体产生的位移几乎不到加固前的一半,坡体的安全系数提高了36.2%及微震监测得到的微震事件降低了约66.4%。

**关键词:** 边坡稳定性; 微震监测; 数值模拟; 安全系数; 抗剪洞

中图分类号: TU93

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)05-1347-08

## Rock-gallery Anti-shear Interaction of Dagangshan Hydropower Station Slope

Xing Yazhi<sup>1</sup>, Li Lianchong<sup>1</sup>, Zhong Bobo<sup>1</sup>, Ma Ke<sup>2</sup>, Tang Chun'an<sup>1</sup>

(1. Center of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, P.R. China; 2. Institute of Mechanic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P.R. China)

**Abstract:** The geological conditions of the right bank slope of Dagangshan hydropower station is complex with high in-situ stress. The geological defects in this slope include diabase dikes, faults moderately dipping outside slope, dense belts of unloading fissures, which make the stability problem of the slope serious. The stability of the slope before and after reinforcement and the interaction of rock-gallery were analyzed by the microseismic monitoring technology in combination of numerical simulations, i.e. the finite difference software FLAC<sup>3D</sup>. The potential sliding surface of slope failure was determined by microseismic events of rock mass spatial damages during slope excavation. The results show that the anti-shear gallery reinforces the slope markedly. The displacement after reinforcement of the slope is less than half of the slope before reinforcement. Safety factor of slope increases 36.2% and the microseismic events reduced by 66.4%.

**Keywords:** slope stability; micro seismicity monitoring; numerical simulation; safety factor; anti-shear gallery

## 0 引言

随着我国经济的快速发展,大规模工程建设的进行以及西部大开发战略的实施,高山峡谷区的一系列重大工程涉及大量高陡岩质边坡的变形稳定问题。尤其是在我国西部地区,例如,雅砻江锦屏

一级水电站左岸斜坡高度达到900 m以上,卸荷裂隙深达200 m<sup>[1]</sup>;拉西瓦水电站拱坝坝顶高程2460 m,两岸边坡约50°~70°,由坝基上部断层切割的不稳定体,断层与拉裂缝构成的变形体对坝基的稳定产生不利影响<sup>[2]</sup>。这些边坡地质构造复杂,特别是在人工开挖卸荷及一系列的工程扰动作

\* 收稿日期: 2017-03-25(修改稿)

作者简介: 邢亚子(1990-) 男,安徽合肥人,硕士生,主要从事高陡边坡稳定性数值模拟分析及微震监测方面的研究。E-mail: xyz1050364344@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51279024);黑龙江科技大学重点实验室开放课题(F2313-03)

用下,其稳定性都进一步劣化。

抗剪洞是一种置于岩体内部穿越软弱结构面的大体积混凝土结构,通过置换不利结构面及软弱岩体,具有较高的抗剪能力,能够有效改善深部软弱结构面的强度,提高边坡抗滑稳定性。抗剪洞是在既有的不稳定边坡上开挖形成的,前期爆破开挖必然会对既有边坡稳定有一定的影响,若处理不当,可能造成滑坡等灾害。抗剪洞按功能划分属于传统边坡加固方法中的抗滑结构一类,但由于施工的难度以及施工技术的成熟,之前在国内外成功运用的案例并不多见。如用锚固洞加固的漫湾水电站 120 m 的左岸坝肩边坡,于 1989 年发生破坏,造成逾亿元的经济损失<sup>[1]</sup>。近年来,随着工程技术的成熟及工程经验的积累,抗剪洞加固技术在安康、白鹤滩、锦屏等水电站边坡处理中均已成功运用<sup>[3-5]</sup>。

抗剪洞常见截面形式多为方形、圆形、城门洞形,如图 1 所示。在实际应用中,方形截面与岩土体咬合作用突出,便于加工,但尖角处易产生应力集中,使得抗剪洞易损坏。圆形截面虽不易产生应力集中,但由于其形状在实际施工中不利于作为施工通道,制作不易,且圆柱形抗剪洞易产生“滚轴”效应,使得抗剪效果大打折扣<sup>[6]</sup>。为了达到最理想的抗剪效果,同时便于施工,最终在大岗山右岸边坡的抗剪洞加固方案中,选择了城门洞形结构。

大岗山水电站右岸边坡坡体高陡、地质边界复杂、施工条件艰难。在自然状态下,边坡能够保持基本的稳定状态,但随着边坡岩体的开挖,卸荷裂隙带 XL-316 易与浅层顺坡向  $f_{231}$  断层组合,形成一系列不稳定块体,使得边坡施工期稳定性问题突出。根据边坡施工过程中的现场跟踪调查,右岸边坡局部位置浅表部曾出现 3 次比较明显的变形破坏现象。通过分析发现,一系列边坡变形的原因均是由于卸荷裂隙带 XL-316、XL-915 与  $f_{231}$  断层以及一系列破碎岩脉易形成不稳定块体,在开挖卸荷后,诱发边坡的一系列变形破坏。为了抑制边坡的结构体变形,最终决定追加投资近 2.5 亿元,采用微膨胀混凝土回填抗剪洞及置换处理软弱结构体的方法对边坡进行加固<sup>[7]</sup>。

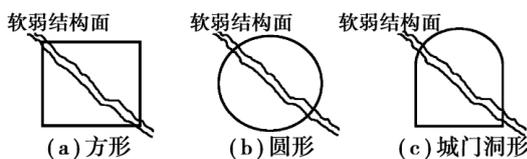


图 1 抗剪洞截面类型

Fig.1 Cross-section structure forms of anti-shear gallery

找到一种切实可行的方法对复杂结构坡体内潜在滑动面形成过程进行监测和预报,一直是国内外众多学者试图解决而至今仍未圆满解决的问题。抗剪洞的引入以及围岩-抗剪洞的两体相互作用,进一步加大了该问题的复杂性。为此,大岗山水电站于 2010 年 4 月在右岸边坡构建了微震监测系统,对抗剪洞加固效果及边坡的整体稳定性进行监测。

本文以大岗山右岸边坡为例,基于微震监测与数值模拟方法,对抗剪洞加固区微震效应及岩-洞两体相互作用机理展开研究,尝试为类似条件边坡的稳定性分析提供些许参考。

## 1 抗剪洞加固区微震监测及微震活动

由于岩质边坡属于类脆性材料,其在宏观破坏之前变形较小,表面位移不够明显,所以边坡开挖后地应力释放,沿卸荷裂隙带有一定的松弛变形<sup>[8]</sup>。但由于断层、卸荷裂隙等复杂的地质条件,应力的释放与转移也具有随机性,造成了部分岩体变形不收敛而施工洞室内又无明显异常变形的现象。

为了能够对边坡内部岩体微破裂和损伤演化过程实时进行动态监测,在大岗山右岸边坡投入使用了微震监测系统。在岩石损伤过程中,伴随孔隙的坍塌或微裂纹的扩展,岩体内部储存的应变能以弹性波的方式快速释放,产生次声波、声波或超声波,即声发射(AE)或微震(MS)现象。声发射的振幅和频率等参数可反映岩石微破裂的数量、尺寸、位置和能量损失等,是与岩石损伤程度相关的。边坡微震监测技术就是利用岩体开挖或者受到施工扰动后本身发射出的弹性波来监测工程岩体稳定性的技术方法<sup>[9-10]</sup>。这些微破裂以弹性能释放的形式产生弹性波,并可被安装在边坡体中有效范围内的传感器接收,利用多个传感器接收这种弹性波信息(如图 2 所示),通过反演方法就可以得到

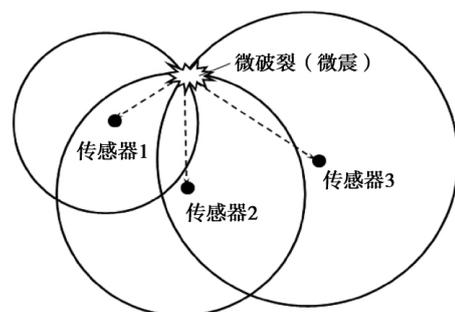


图 2 微震监测原理图

Fig.2 Principle of microseismic monitoring

岩体微破裂发生的时刻、位置和性质,即地球物理学中所谓的“时空强”三要素。根据微破裂的大小、集中程度、破裂密度,就有可能推断岩石宏观破裂的发展趋势,这便是微震监测技术的核心思想。

大岗山右岸边坡采用的是加拿大ESG公司生产的微震监测系统,在位于右岸边坡11个高程的洞室中,布设22个阵列传感器进行长期24h动态实时监测。监测范围可覆盖以坝肩为中心,沿河流方向上下游300m,高程在800~1400m之间以及由坡表向岩体内部400m的范围(600m×600m×400m,如图3(b)所示)。从2010年5月微震监测系统进场至2011年9月边坡大规模主体开挖施工结束,共采集到1506个微震事件,经过噪音识别、筛选、剔除,研究有效区域内得到微震事件1337个,微震事件大小和颜色分别表示微震的能量大小和矩震级,微震事件数分布总体比较平稳,没有出现某一区域短时间内事件数突增的危险现象,这说明右岸边坡总体上相对稳定。边坡开挖过程中产

生的微震事件呈条带状分布在1135m高程到1240m高程之间和拱肩槽附近,即断层 $f_{231}$ 的上盘裂隙带XL-316的下部区域(图4)。微震事件能量密度较大区域主要集中在1225m高程以下,沿主控结构体XL-316和 $f_{231}$ 断层贯通边坡上下。开挖引起能量损失区域不断增大,微破裂累积不断延伸,当弹性区受到释放能量叠加的应力小于岩体材料的弹性强度,破坏区不再扩展,破坏面也就不再扩大。破坏过程中能量损失主要集中在1135~1240m高程卸荷裂隙带XL-316和979~1100m高程 $f_{231}$ 断层附近(图5红色区域),且发生在距坡表80~150m左右,这与地勘资料所揭示的地质条件相吻合。

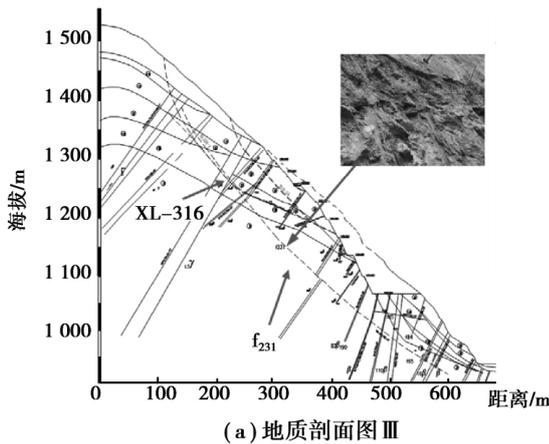


图3 边坡地质情况及微震监测布线

Fig.3 Geological features of Dagangshan slope and spatial arrangement diagram of sensors

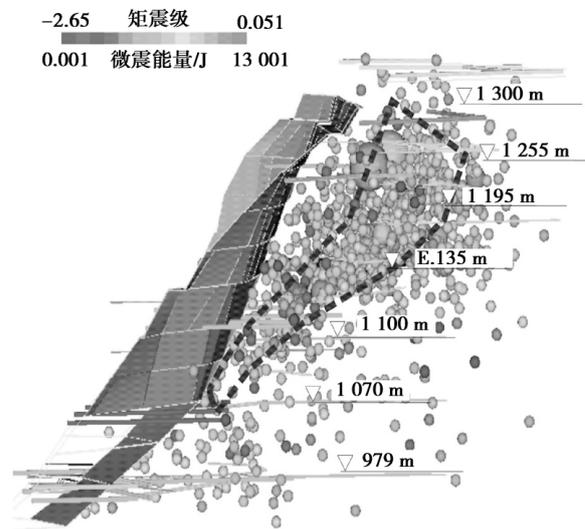


图4 边坡开挖过程中微震事件空间分布图

Fig.4 The overall view of the recorded microseismic events during excavation of slope

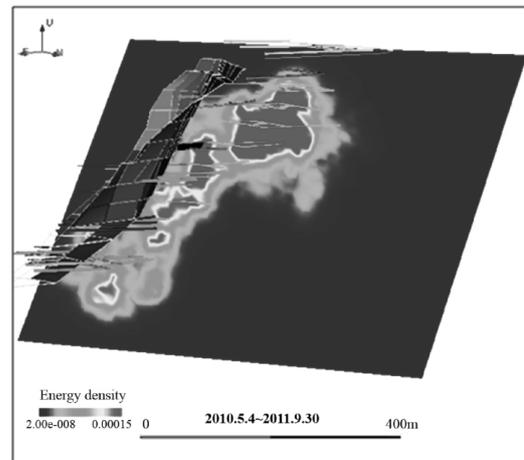


图5 开挖期间微震事件能量损失密度月累计空间分布规律

Fig.5 The overall view of the energy loss density contour of microseismic events during excavation of slope

## 2 岩-洞相互作用分析

### 2.1 计算模型

根据右岸边坡的基本地形、地质条件,针对以卸荷裂隙带 XL-316、XL-915 和断层  $f_{231}$  为主控结构面的不稳定破体结构,工程上实施以抗剪洞为主的加固措施,来保证边坡的整体稳定。主要在(缆机) 0+074.60~+219.30 范围 1 180 m 高程,(缆机) 0+070.40~+171.80 范围 1 150 m 高程,(缆机) 0+081.10~+148.40 范围 1 120 m 高程,(缆机) 0+055.20~+109.50 范围 1 060 m 高程,对卸荷裂隙带 XL-316 采用抗剪洞进行置换处理,主要置换处理对象是 1 240.00 m 和 1 210.00 m 高程处的卸荷裂隙带 XL-316、XL-915 及辉绿岩脉。抗剪洞尺寸为 8.00 m×9.00 m(宽×高)。6 条抗剪洞的布置如图 6 所示。

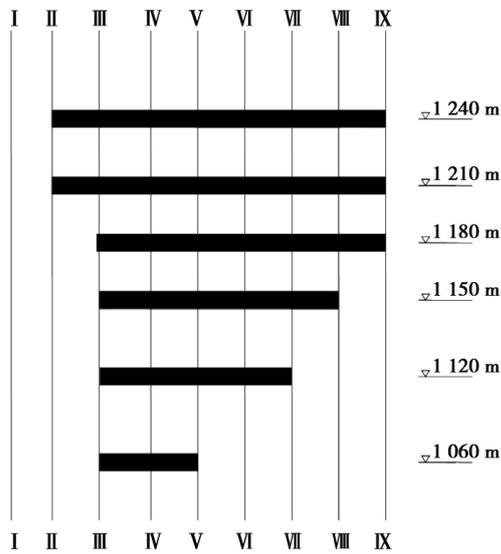


图 6 抗剪洞加固方案平面布置图  
Fig.6 Sketch of anti-shear gallery model

为了分析抗剪洞承载力及岩-洞两体相互作用,根据右岸边坡的实际地质条件,建立与微震监测范围等比例的三维模型。模型横河向 600 m,沿河向 400 m,高 600 m。模型共有 9 个剖面 8 块组合而成,不同的岩体用不同的颜色表示,如图 7 所示。模型构建是在大型商用软件 ANSYS 中构建完成,加固前模型共剖分四面体单元 167 108 个,节点 29 498 个,加固后模型共剖分四面体单元 279 266 个,节点 48 285 个。然后运用 ansys-to-flac 接口程序将模型导入 FLAC<sup>3D</sup> 中进行计算。计算域四周法向约束,底部采用固定铰支座,地表自由。边坡在自然条件下已达到稳定状态,卸荷充分,其构造应力一般只考虑自身重力。模型中含 6 个岩层,两条大的辉绿岩脉  $\beta_5$ 、 $\gamma_{L5}$ ,由于卸荷裂隙 XL-316 与 XL-915 与断层  $f_{231}$  三者相连,故在模型中用一个大型软弱夹层替代。计算参数按表 1 取值,其中辉绿岩脉取所在岩体参数。

表 1 计算模型岩体参数取值表  
Table 1 Physico-mechanical parameters employed in simulation

材料编号	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	抗压强度/ /MPa	变形模量/ /GPa	泊松比	摩擦因数	粘聚力/ /MPa
II	2.65	70~80	18.00~25.00	0.25	1.30	2.000
III <sub>1</sub>	2.62	40~60	9.00~11.00	0.27	1.20	1.500
III <sub>2</sub>	2.62	40~60	6.00~9.00	0.30	1.00	1.000
IV	2.58	20~40	2.50~3.50	0.35	0.80	0.700
V1	2.45	<15	0.25~0.50	>0.35	0.50	0.200
V2	2.10	<10	0.20	>0.35	0.40	0.175
C25 混凝土	2.40	25	30.00	0.25	1.25	1.250

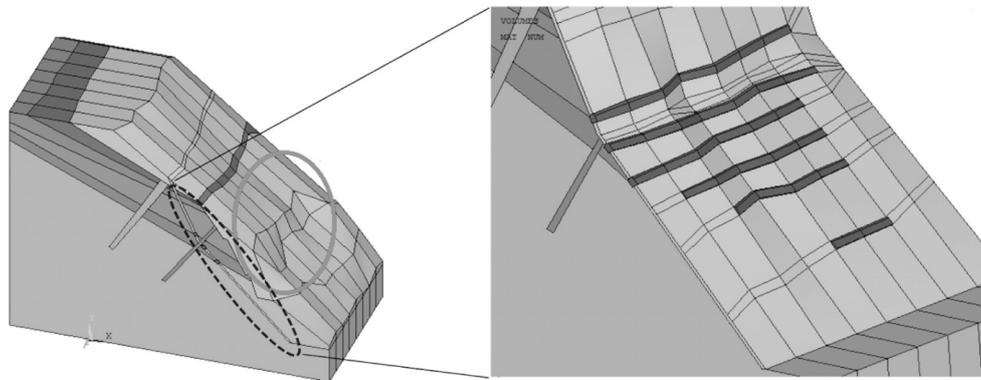
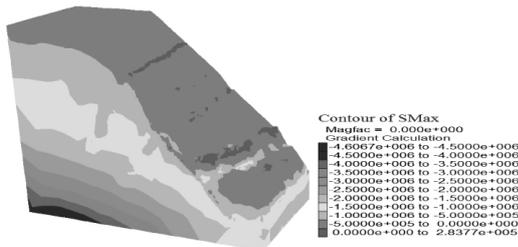


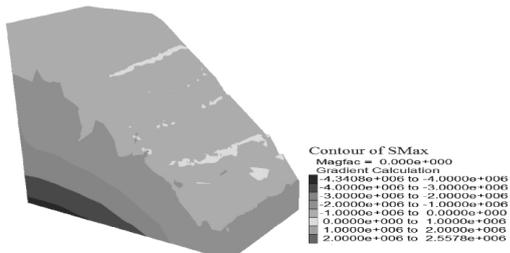
图 7 原始边坡计算模型  
Fig.7 Original computation model of the right bank slope

2.2 抗剪洞承载力分析

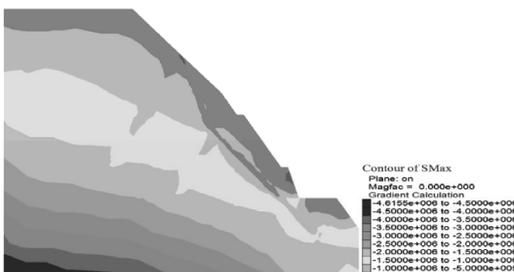
基于上述模型, 首先进行弹性求解。从边坡整体主应力云图(图 8) 中发现, 未设抗剪洞时, 拉应力主要出现在卸荷裂隙上缘、1 135 m 处的坝顶平台以及 1 255 m 处缆机平台的局部。而增设抗剪洞之后, 对比主应力云图, 虽然跟未设抗剪洞一样在坡面的 3 个相同位置仍然出现拉应力, 但最大拉应力并非出现在坡面而是集中在抗剪洞处, 且最大



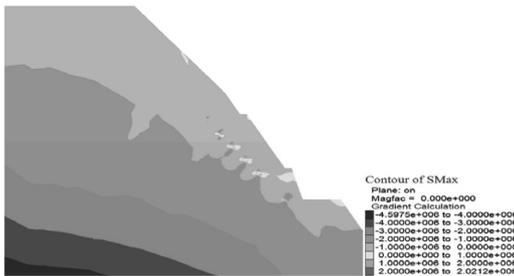
(a) 加固前边坡 SMAX 云图



(b) 加固后边坡 SMAX 云图



(c) 加固前边剖面 VI SMAX 云图



(d) 加固后边剖面 VI SMAX 云图

图 8 加固前后边坡的 SMAX 云图

Fig.8 SMAX nephograms of the right bank slope

before and after reinforcement

拉应力急剧提升至 2.56 MPa, 应力集中明显, 说明抗剪洞着实发挥了抗剪作用, 调和了卸荷裂隙带两侧坡体错动诱致的变形。为了更清楚地观察应力分布情况, 同时截取抗剪洞增设前后模型的第 VI 剖面进行对比分析(第 VI 剖面同时含 6 根抗剪洞, 对比效果明显)。未设抗剪洞时, 沿着卸荷裂隙带和断层有着较为明显的应力降低现象, 坡脚处则出现了一定的应力集中, 而在坝顶平台下缘、坡底以上一定范围, 出现拉应力。常见的“坡底隆起”现象正是由此而起。说明边坡有着以断层  $f_{231}$  为底滑面, 卸荷裂隙带 XL-316 为上缘的主控结构面滑裂的趋势。这与前述边坡开挖过程中微震监测所得微震事件能量损失密度月累计空间分布规律图揭示的规律十分吻合。而增设抗剪洞之后, 并未发现沿着边坡主控结构面有明显的应力降低, 但是在抗剪洞加固处出现了明显的应力集中状况。这是因为抗剪洞的存在使得应力“迁徙”到抗剪洞加固区附近。抗剪洞承受着巨大的张拉-剪切作用, 这与微震监测捕捉到的边坡岩体视在变形区非常吻合。

2.3 抗剪洞区域岩体变形分析

微震视在变形区是根据微震监测所得应力波反演而得的区域岩体的位移, 见式<sup>[11]</sup>:

$$M = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.0 \quad (1)$$

$$u = M_0 / GA \quad (2)$$

式中:  $M$  为矩震级;  $M_0$  为地震矩(在断裂面上等于剪切模量  $G$  的应力使断裂面两侧错开  $u$  时所做的功);  $A$  为微破裂面积;  $G$  为剪切模量;  $u$  为破裂面相对错开位移。

从视在变形区云图(图 9) 可看出, 6 根抗剪洞附近均产生明显异常的位移场, 这正是由于增设抗剪洞后抗剪洞附近应力集中, 从而使岩体产生大量微破裂。特别是 2、3、4、5 根抗剪洞附近位移变形明显较 1、6 根抗剪洞附近更为强烈, 这也与图 8 (d) 剖面 VI 主应力云图非常吻合。说明整个边坡不稳定块体主要作用都施加在断层  $f_{231}$  的中上部, 是变形监测的重点区域。

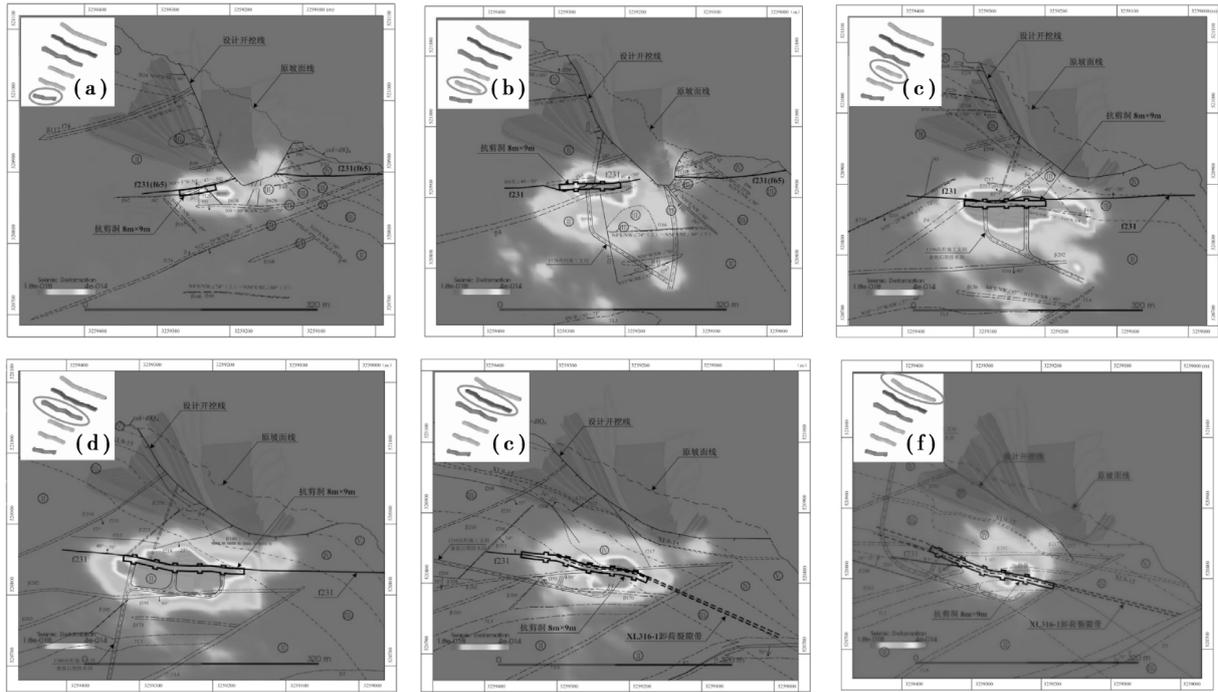


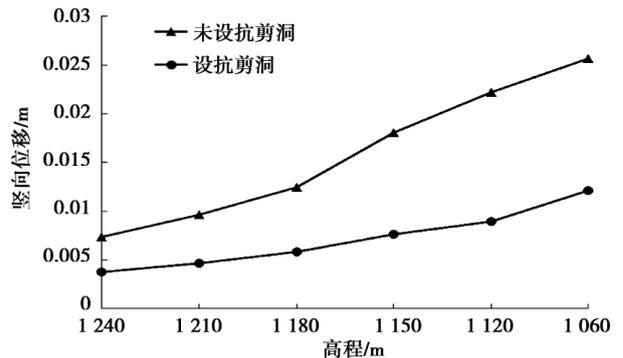
图 9 抗剪洞加固后的微震视在变形区

Fig.9 Microseismic deformation with anti-shear gallery reinforcement

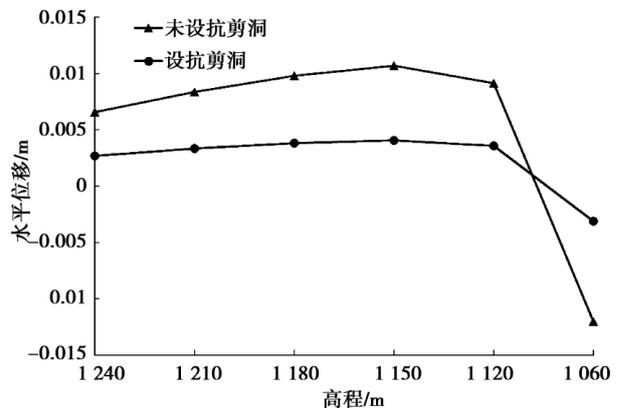
计算过程中对 6 根抗剪洞附近取点 就抗剪洞增设前后分别监测其竖向和横向位移 得到二者曲线图如图 10 所示。从曲线中可以清楚地发现 增设抗剪洞后 坡体位移较加固之前降低了一半之多。坡体的位移从上至下逐渐增大 其中竖向位移增大趋势明显 加固前 位移值从 1 180 m 高程往下急剧增大 说明整个卸荷裂隙带与断层组成的不稳定块体在下部易产生大位移 从而滑坏 即先出现局部破坏 进而整体失稳。而抗剪洞加固之后 位移较未加固之前大幅降低且整体增长缓慢 说明抗剪洞对边坡不仅起到了加固的作用 还提高了边坡的整体稳定性。

### 2.4 边坡潜在滑面及安全系数分析

为了进一步讨论抗剪洞的加固效果 对模型进行弹塑性求解。计算采用典型的摩尔库伦强度破坏准则 运用强度折减法 分别求解加固前后边坡的潜在滑动面及安全系数。从剪应变云图(图 11)可以清晰地看到 边坡最终的破坏形式为以卸荷裂隙 XL-316 为后缘拉裂带、 $f_{231}$  为底滑面的边坡块体整体滑落。经计算求得 加固前边坡的安全系数为 1.27 而加固后安全系数达到 1.73 较未设抗剪洞时提高了 36.2%左右。



(a) 竖向位移



(b) 水平位移

图 10 加固前后监测点位移对比曲线

Fig.10 Comparison of the monitoring points displacement before and after the reinforcement

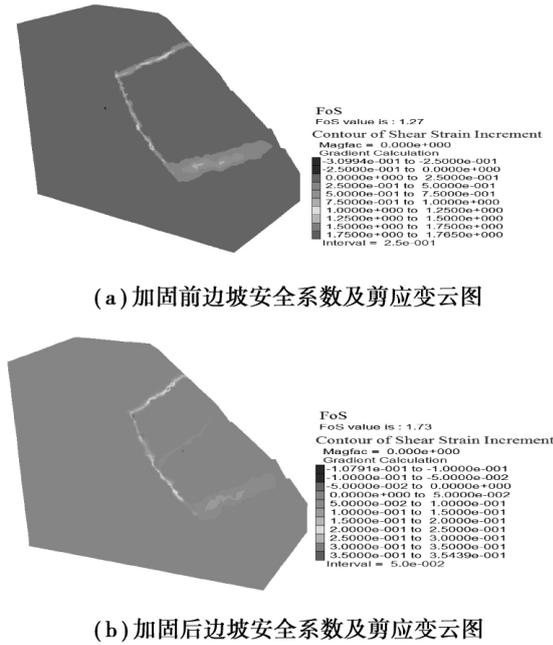
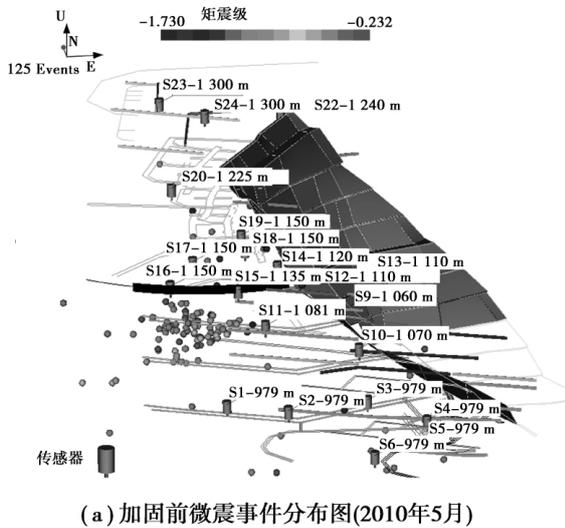
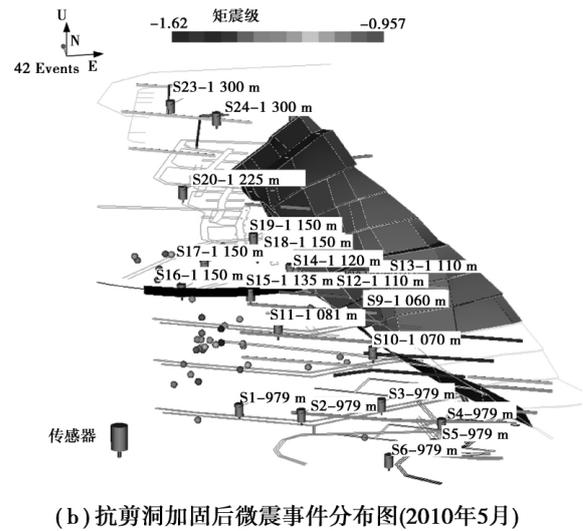


图 11 加固前后边坡安全系数及剪应变云图  
Fig.11 Safety factor and shear strain nephograms before and after the reinforcement

抗剪洞加固前、后微震事件变化情况如图 12 所示。从图 12 可知,截至 2012 年 5 月底,随着 6 条抗剪洞陆续施工完成,当月微震监测到的微震时间只有 42 个,较 2010 年 5 月份增设抗剪洞之前的 125 个微震事件约减少了 66.4%<sup>[12]</sup>。这说明,增设抗剪洞使得边坡深部岩体损伤趋势减小,微震活动性逐步减弱,边坡内部卸荷诱发的损伤逐渐趋于停止,进一步证明了边坡的稳定性得到提高。



(a) 加固前微震事件分布图(2010年5月)



(b) 抗剪洞加固后微震事件分布图(2010年5月)

图 12 抗剪洞加固前后微震事件变化

Fig.12 Change of microseismic events before and after anti-shear gallery reinforcement

### 3 结论

(1) 边坡开挖卸荷使得坡体内部出现应力集中、应力释放和应力转移,在此过程中产生了大量的微震事件。通过捕捉到的这些微震事件,进一步明晰了深部岩体损伤空间、边坡的主控结构面及潜在滑体:以深部卸荷裂缝 XL-316 和 XL-915 为后缘拉裂带,大型断层  $f_{231}$  为底滑面及其 envelop 空间构成的大软潜在滑块。

(2) 通过数值模拟可知,边坡加固后,在抗剪洞附近出现了明显的应力集中,这说明增设抗剪洞后,应力“迁徙”到抗剪洞附近,抗剪洞承受了很强的滑体下滑力,其中以卸荷裂隙带与断层交界处至断层中部的 4 根抗剪洞表现最为强烈,微破裂即是高应力的显现。因此,数值模拟结果与微震监测捕捉到的边坡岩体视在变形区非常吻合,说明抗剪洞起到了很好的加固作用。

(3) 通过监测第 VI 剖面加固前后 6 条抗剪洞附近位置的位移,可以清楚地看到,加固后坡体产生的位移几乎不到加固前的一半,而且加固后各监测点位移随着高程的降低而增长速度较未加固时更为平稳而且缓慢。加固后坡体的安全系数提高了 36.2%,而加固后微震监测得到的微震事件降低了约 66.4%,数值模拟与微震监测相互

印证了各自的合理性,以及抗剪洞加固区岩-洞相互作用机制。

#### 参考文献(References)

- [1] 祝介旺,庄华泽,李建伟,等.大型边坡加固技术的研究[J].工程地质学报,2008,16(3):365-370.(Zhu Jiewang,Zhuang Huaze,Li Jianwei,et al. Research on reinforcement technique of slope with large dimensions[J]. Journal of Engineering Geology,2008,16(3):365-370.(in Chinese))
- [2] 周述椿,王常让,朱文杰.拉西瓦水电站拱坝左坝肩抗剪洞布置探讨[J].水力发电,2007,33(11):43-44,73.(Zhou Shuchun,Wang Changrang,Zhu Wenjie. Arrangement of shearing-resistance tunnel at left abutment of laxiwa arch dam[J]. Water Power,2007,33(11):43-44,73.(in Chinese))
- [3] 林柏年,王伯驷,郝通琴.安康水电站拦河坝深层抗滑稳定分析和基础处理设计[J].水力发电,1990,16(11):37-41.(Lin Bainian,Wang Bolu,Hao Tongqing. Stability analysis and foundation treatment design of Ankang hydropower station barrage[J]. Water Power,1990,16(11):37-41.(in Chinese))
- [4] 宁宇,徐卫亚,郑文棠,等.白鹤滩水电站拱坝及坝肩加固效果分析及整体安全度评价[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1890-1898.(Ning Yu,Xu Weiya,Zheng Wentang,et al. Reinforcement effect analysis and global safety evaluation of arch dam and abutment of Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(9):1890-1898.(in Chinese))
- [5] Xu N W,Tang C A,Li L C,et al. Microseismic monitoring and stability analysis of the left bank slope in Jinping first stage hydropower station[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2011,48(6):950-963.
- [6] 向柏宇,姜清辉,周钟,等.深埋混凝土抗剪结构加固设计方法及其在大型边坡工程治理中的应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):289-302.(Xiang Boyu,Jiang Qinghui,Zhou Zhong,et al. Reinforcement design method for deep embedded concrete shear resistance structure and its application to large scale engineering slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(2):289-302.(in Chinese))
- [7] 水电工程顾问集团成都勘测设计研究院.四川省大渡河大岗山水电站右岸边坡稳定分析与加固措施研究专题报告[R].成都:中国水电工程顾问集团成都勘测设计研究院,2009.(Hydropower Engineering Consulting Group Chengdu Survey and Design Institute. Sichuan province Daduhe Dagangshan hydropower station right bank slope stability analysis and reinforcement measures special reports[R]. Chengdu: China Hydropower Engineering Consulting Group Chengdu Survey and Design Institute,2009.(in Chinese))
- [8] 单仁亮,杨昊,王述红,等.节理化岩质边坡开挖稳定性分析及支护方案设计[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):1016-1022.(Shan Renliang,Yang Hao,Wang Shuhong,et al. Stability Analysis on Jointed Rock Slope Excavation and Design of Strengthening Scheme[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(4):1016-1022.(in Chinese))
- [9] Cheon D S,Jung Y B,Park E S,et al. Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with wave guides[J]. Engineering Geology,2011,121(1):75-88.
- [10] Blake W,Leighton F,Duvall W I. Microseismic techniques for monitoring the behavior of rock structures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts,1975,12(4):69.
- [11] 胡聿贤.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版社,2006.(Du Yuxian. Earthquake Engineering(Second Edition)[M]. Beijing: Earthquake Press,2006.(in Chinese))
- [12] 马克,唐春安,徐奴文,等.四川省大渡河大岗山水电站右岸边坡微震监测工程结题报告[R].大连:大连理工大学,2012.(Ma Ke,Tang Chun'an,Xu Nuwen et al. Sichuan province Daduhe Dagangshan hydropower station right bank slope microseismic monitoring project concluding report[R]. Dalian: Dalian University of Technology,2012.(in Chinese))