

DOI: 10.11779/CJGE201705011

基于微震能量演化的大岗山右岸边坡抗剪洞加固效果研究

庄端阳^{1, 2}, 唐春安^{1, 2}, 梁正召^{1, 2}, 马 克^{2, 3}

(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. 大连理工大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024;
3. 力软科技(大连)股份有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘要: 微震监测技术在岩体工程监测中获得了广泛的应用, 但如何依据微震监测数据来评价岩体工程的稳定性, 至今还存在很多问题。以大岗山右岸边坡工程为研究背景, 基于定量微震学原理, 采用微震能量密度来综合反映岩体微破裂分布特征, 并在理论上推导微震能量-频度关系, 提出以 b_ε 值来表征岩体微破裂变形程度, 进一步研究了该边坡抗剪洞加固前后边坡岩体微震能量转移特征、震源机制、变形特性及其稳定性演化规律。研究结果表明, 微震能量密度可以帮助识别边坡潜在危险区域, 能量-频度关系中的 b_ε 值的变化揭示了边坡微破裂与变形的演化过程; 抗剪洞加固后边坡微震事件活动率和能量密度均明显降低, 边坡受力性能明显改善; 边坡开挖期间抗剪洞加固区岩体微震的 b_ε 值小幅降低, 并在抗剪洞加固后有所增加, 表明抗剪洞抑制了岩体微破裂及变形, 提高了边坡稳定性。通过对工程现场变形监测结果, 验证了方法的可靠性。提出的微震能量密度及能量-频度关系相结合的评价方法, 丰富了工程岩体稳定性微震分析方法, 可为类似岩质边坡加固措施的选择及稳定性分析提供参考。

关键词: 岩石高边坡; 抗剪洞; 能量密度; 能量-频度关系; 能量转移; 稳定性

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0868-11

作者简介: 庄端阳(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事工程岩体微震监测及稳定性分析方面的研究工作。E-mail: zhuangdy@mail.dlut.edu.cn。

Reinforcement effect of anti-shear tunnels of Dagangshan right bank slope based on microseismic energy evolution

ZHUANG Duan-yang^{1, 2}, TANG Chun-an^{1, 2}, LIANG Zheng-zhao^{1, 2}, MA Ke^{2, 3}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Mechsoft (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116600, China)

Abstract: Microseismic monitoring technology has been widely used in rock mass engineering monitoring. There are still many problems in stability evaluation of rock mass engineering using the microseismic data. In this study, microseismic energy density is proposed to characterize the micro-crack distributions of rock mass based on the quantitative seismology. Besides, the energy-frequency relation is derived theoretically and the b_ε value is used to represent the micro-cracking deformation. Then the microseismic energy transference and evolutions of focal mechanism, micro-cracking deformation and stability of Dagangshan right bank slope before and after reinforcement by anti-shear tunnels are discussed. Some conclusions are drawn as follows: Firstly, potential dangerous area of the slope can be determined using the microseismic energy density, and evolutions of micro-cracking deformation and rock stability are revealed by tracking the variation of b_ε value in the energy-frequency relation. Secondly, the microseismic event rate and energy density decrease significantly after reinforcement, and its mechanical behavior is obviously improved. Finally, the b_ε value of reinforced rock masses decreases slightly along with slope excavation and increases after reinforcement, which demonstrates that the micro-cracking deformation is controlled and the stability is improved after reinforcement, and these are in accordance with the monitoring results of slope deformation, validating the reliability of the proposed method, which enriches the microseismic analysis methods for rock mass engineering stability. It may provide references for choosing

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目
(2014CB047100); 国家自然科学基金项目(51274053)

收稿日期: 2016-01-20

reinforcement methods and analyzing stability in similar rock slopes.

Key words: high rock slope; anti-shear tunnel; energy density; energy-frequency relation; energy transference; stability

0 引言

在大型水利水电工程建设中, 河谷边坡岩体的开挖是形成工程边坡的重要步骤, 深切河谷和200~300 m级高坝导致岩石高边坡开挖规模巨大, 使得开挖扰动区的分布和演化规律复杂化, 造成边坡稳定性问题的突出, 由此引起的边坡工程事故更是屡见不鲜^[1-2], 迫使人们加紧对岩石高边坡的加固方法及其加固效果评价的研究。

抗剪洞作为岩石高边坡加固的一种方法, 采用大体积(膨胀)混凝土置换边坡内部软弱结构面或破碎岩体, 加强结构面的抗剪强度及刚度, 改善边坡受力性能, 从而提高边坡的抗滑稳定性。近年来, 抗剪洞的实践伴随着岩石高边坡的不断出现及施工技术的持续进步而愈加广泛^[3], 关于其加固效果评价的研究也受到学者们的持续关注。漆祖芳等^[4]采用有限元强度折减法研究锦屏一级左岸边坡抗剪洞的加固作用, 加固后的拉裂变形体的安全裕度明显增加。黎满林等^[5]通过极限平衡计算和变形监测资料分析发现大岗山右岸边坡抗剪洞加固后满足稳定性控制标准, 边坡稳定状态良好。基于岩石破裂过程分析方法, 马克等^[6]揭示了大岗山右岸边坡与抗剪洞的相互作用机理及变形协调分担机制, 其还通过抗剪洞加固前后边坡月微震事件个数的下降初步说明抗剪洞对边坡微破裂萌生的抑制作用, 但尚不能表征边坡岩体能量释放规律、震源机制及其稳定性的演化进程。

作为一种岩体微破裂三维空间原位监测手段, 微震监测已在水电边坡、隧道、矿山等^[7-8]工程安全领域获得了广泛的应用, 但如何依据微震监测数据来评价岩体工程稳定性, 目前还没有有效的方法。大岗山水电站右岸边坡地质条件复杂, 在持续的开挖扰动下, 诱发了宏观裂缝的产生。本文以此为背景, 基于定量微震学原理, 定义微震能量密度, 综合反映岩体微破裂分布和强度; 推导微震能量-频度关系, 提出采用 b_e 值表征岩体微破裂变形; 结合微震能量密度和能量-频度关系, 研究了大岗山右岸边坡抗剪洞加固前后边坡岩体微震能量转移特征、震源机制、变形特性及其稳定性演化进程, 更加全面地评价了抗剪洞的加固效果。研究成果丰富了工程岩体稳定性微震分析方法, 可以为类似岩石高边坡工程微震监测设计、加固措施的选择及边坡稳定性评价提供参考。

1 右岸边坡抗剪洞及微震监测系统

1.1 右岸边坡工程概况

大岗山水电站位于四川省石棉县挖角乡境内。坝址区两岸谷坡陡峻, 河谷深切。右岸边坡基岩岩性为灰白色、微红色中粒黑云二长花岗岩(γ_{24-1}), 局部出露辉绿岩脉(β)、花岗细晶岩脉(γ_L)等(如图1(a)所示)。边坡在长期浅表生改造作用下, 卸荷强烈, 导致中倾坡外的结构面发育, 降低了边坡的稳定性, 使其具有“坡体陡峭、地质条件复杂、稳定性

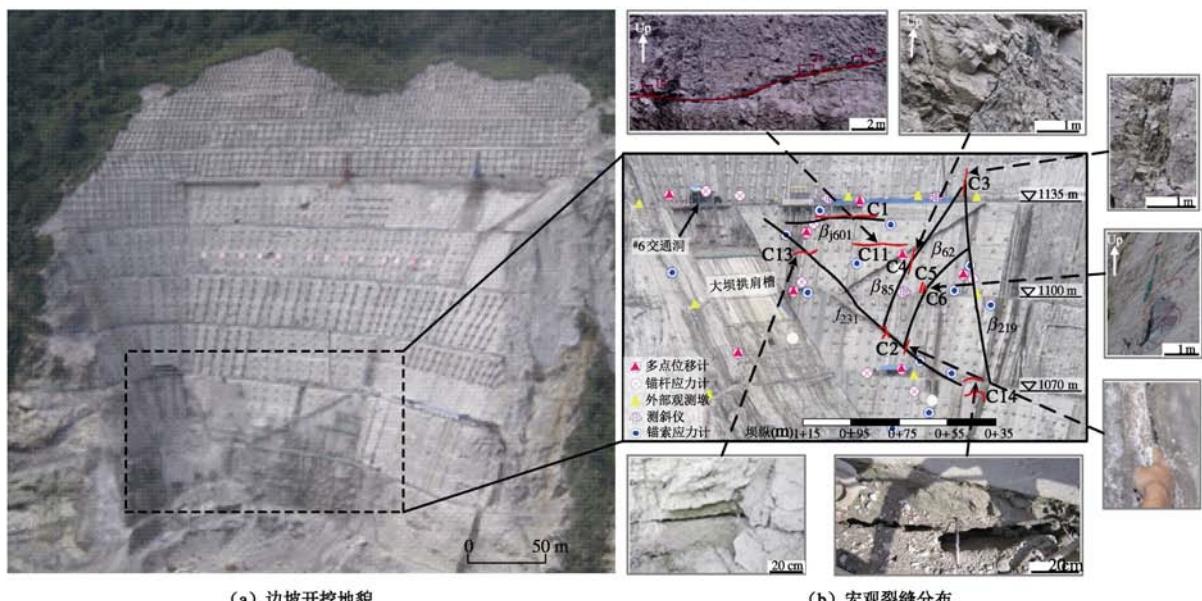


图1 右岸边坡开挖地貌及坡表宏观裂缝分布图

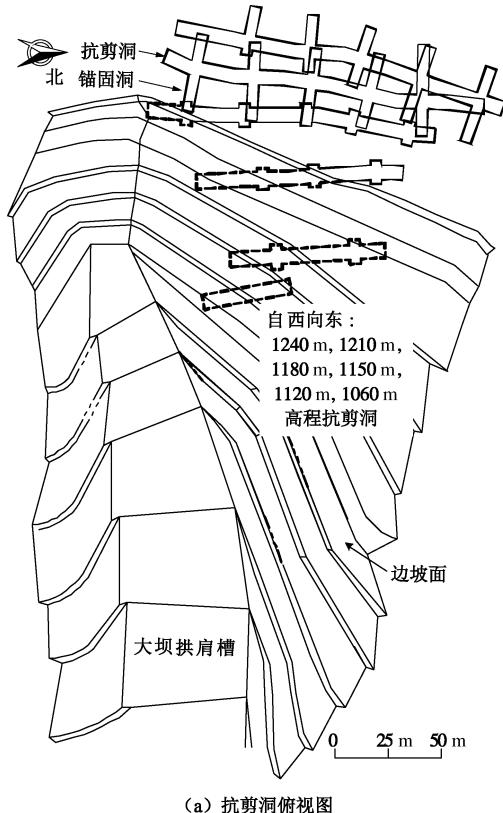
Fig. 1 Geomorphic photograph and positions of macroscopic cracks of excavated right bank slope

问题突出”的特征^[9]。

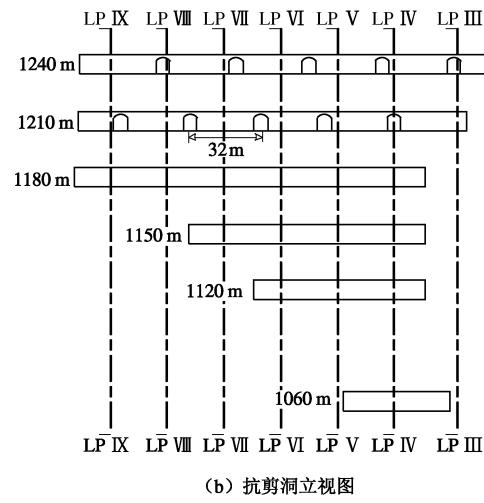
右岸边坡内部发育的辉绿岩脉 β_{62} , β_{85} , β_{219} , β_{j601} 和 F_{231} 断层等结构面在爆破开挖作用下发生扰动, 诱发岩体微破裂的萌生、扩展和成核, 并在上述结构面出露处形成宏观裂缝。图1(b)为截止2009年9月右岸边坡开挖至1070 m高程, 坡表8处较明显宏观裂缝的分布位置^[9]。经过进一步勘探分析, 发现右岸边坡中以 XL_{316-1} 为代表的中倾坡外深部卸荷裂隙密集带和以 f_{231} 为代表的中等倾角顺坡向断层构成了对边坡稳定起控制性作用的结构面^[5], 其在开挖作用下的持续扰动, 导致了边坡表面若干条宏观裂缝的产生, 使得开挖边坡的稳定性下降, 开挖工作被迫暂停。

1.2 抗剪洞加固处理

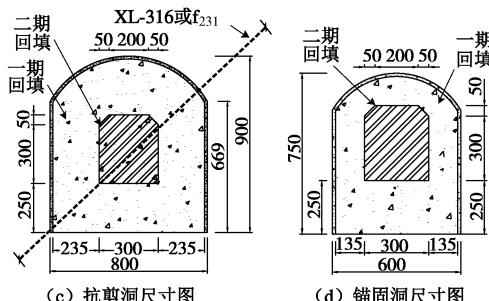
根据边坡地质条件、可能滑移模式, 并结合现场施工条件, 确定采用边坡抗剪洞加固方法来抑制边坡结构体的持续变形, 保证边坡的稳定。6层抗剪洞沿卸荷裂隙带 XL_{316-1} 和 f_{231} 断层走向分别布置在 1240, 1210, 1180, 1150, 1120, 1060 m 高程, 其空间位置及尺寸见图2。2010年6月, 低高程3层抗剪洞开挖和回填完成后, 边坡恢复开挖, 至2011年6月边坡开挖至917 m大坝建基面高程; 2011年9月30日抗剪洞及边坡主体开挖完成, 至2011年11月抗剪洞回填加固完成。



(a) 抗剪洞俯视图



(b) 抗剪洞立视图



单位:cm

图2 右岸边坡抗剪洞加固方案图

Fig. 2 Layout of anti-shear tunnels of right bank slope

1.3 微震监测系统

为了探究右岸边坡开挖和加固过程中深部岩体微破裂演化规律, 同时为边坡抗剪洞加固方案的动态调整提供参考, 本课题组引入加拿大 ESG 公司生产的高精度微震监测系统, 对开挖和加固后边坡岩体微破裂进行全天候的监测和分析。微震监测系统 (MMS) 组成如图3所示, 22通道高精度传感器布设在11个高程上, 重点覆盖右岸边坡抗剪洞加固区域和大坝拱肩槽深部的岩体, 定位精度在10 m以内^[7]。

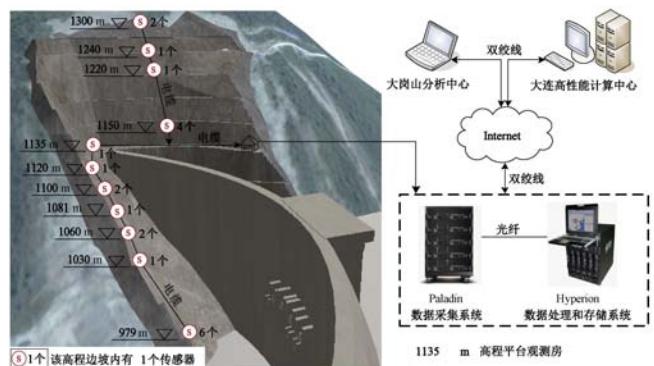


图3 右岸边坡微震监测系统方案布置图

Fig. 3 Layout of MMS in right bank slope

2 微震能量分布特征参数

2.1 微震能量密度

岩体发生破裂和滑移过程中会发生弹性应变能向非弹性应变能的转化, 除去破裂和地震波传播过程中耗散的能量, 剩下的即为被传感器接收到的地震(辐射)能量。作为微破裂事件强度的一种度量, 微震能量广泛应用于矿山微震活动性研究当中^[10]。震源体微震能量可以通过监测获取的体波(P波和S波)计算得到^[11]

$$E = 4\pi\rho v R^2 \frac{J_c}{F_c} , \quad (1)$$

式中, E 为微震能量, ρ 为岩体密度, v 为岩体弹性波速, R 为震源到传感器的距离, J_c 为能通量, 可以通过质点速度谱在频域中积分获得, F_c 为地震波辐射类型经验系数, 对于 P 波和 S 波分别取 0.52 和 0.63^[12], 两种体波计算的能量总和就是微震能量。

根据定量微震学原理, 微震震源体积可以用

$$V = M_0 / \Delta\sigma \quad (2)$$

来估计, V 为震源非弹性变形区岩体的体积。式中, M_0 为微震事件的地震矩, $\Delta\sigma$ 为震源破裂前后应力降, 依赖于计算模型^[13]。地震矩与 P 波或 S 波的远场位移谱低频幅值 Ω_0 的关系如式(3)所示, 并被认为是小地震事件(如矿山地震)地震矩的可靠测定^[14]:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho c^3 R \Omega_0}{F_c} . \quad (3)$$

实际监测中, 常用视应力 σ_A 来描述震源区动态应力释放水平, 用视体积 V_A 来测量具有震源非弹性变形的岩体体积^[15], 二者均为标量, 且不依赖于计算模型, 定义如下, 可用于研究震源变形区的分布和岩体中应力的转移。

$$\sigma_A = \mu E / M_0 , \quad (4)$$

式中, μ 为岩体刚度。由于通常情况下, $\Delta\sigma \geq 2\sigma_A$, 故 Mendecki^[13]给出

$$V_A = M_0 / 2\sigma_A . \quad (5)$$

虽然地震矩是对微震总体强度最适当的描述, 但与其相比, 微震能量可以更好地描述工程岩体微震的潜在影响范围及程度。定义微震能量密度如下:

$$E_d = E / V_A . \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入式(6), 并假设震源体视应变与应变改变量相等, 可得

$$E_d = 2\sigma_A \cdot \varepsilon_A \approx \Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon . \quad (7)$$

微震能量密度作为单位体积岩体发生微破裂时释放的能量, 不仅可以综合反映岩体微破裂的位置和强度, 而且可以表征震源区岩体应变能的储存及释放进

程, 并探究扰动作用下工程岩体的状态。边坡岩体中高能量密度分布的区域是岩体应力和能量累积达到岩体强度后的高能量释放区域, 也是边坡微破裂集中和岩体损伤的区域。

2.2 能量 - 频度关系

微震能量可以反映岩体潜在受扰动范围及程度, 但目前尚不能直接反映微破裂震源机制。本文参考相关研究成果, 考虑微震能量与地震矩的双对数关系^[16], 结合成功应用于岩石高边坡灾害风险评价^[17]的震级 - 频度关系, 阐明微震能量 - 频度关系, 研究抗剪洞加固区岩体微震震源机制及其稳定性演化进程。

微震能量与地震矩的量纲均为 [$M \cdot L^2 \cdot T^2$], 二者之间存在如下关系^[16]:

$$\lg E = c + d \lg M_0 , \quad (8)$$

式中, c 为常数, 与岩体应力水平有关, d 与岩体刚度有关, 通常取 1.2~1.6。选取大岗山右岸边坡 2010 年 5 月 4 日—2012 年 5 月 31 日的微震事件数据, 绘制图 4 所示的微震能量与地震矩关系图。采用线性最小二乘拟合计算出 c 和 d 分别为 -11.2925 与 1.5501。

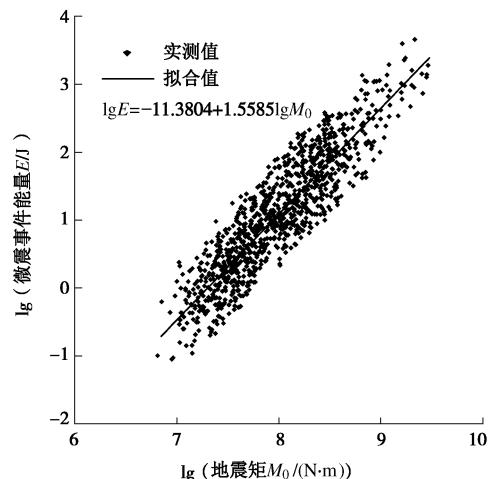


图 4 右岸边坡微震事件能量与地震矩关系图

Fig. 4 Relationship between energy and seismic moment of microseismic events of right bank slope

震级 - 频度关系中的 b_L 值作为具有一定物理意义的统计分析参数, 表征岩体平均应力水平^[18], 随着地震震源机制的不同而变化, 其表达式为

$$\lg N(M_L) = a_L - b_L M_L , \quad (9)$$

式中, M_L 为地方性震级, $N(M_L)$ 为以震级 M_L 为中心的小区间 ($M_L + \Delta M_L$) 在一定时期内发生地震的次数, a_L 和 b_L 为常数。断层滑移型地震活动通常对应较小的 b_L 值(一般小于 0.8), 而采矿诱发的应力迁移型地震活动的 b_L 值通常在 1.2~1.5 之间^[17]。

式(9)中震级采用的地方性震级是相对震级, 并不直接与震源的物理过程相关联^[19]。作为表征地震绝

对大小的量, 矩震级 M 是当今国际地震学界推荐优先使用的震级标度, 其表达式^[20]为

$$M = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.0 \quad . \quad (10)$$

因此, 有必要采用矩震级的震级-频度关系来表征震源机制。图 5 为右岸边坡微震监测获取的地方性震级与矩震级的分布图, 可以发现二者之间基本满足线性关系, 可以表示为

$$M_L = m + nM \quad , \quad (11)$$

式中, m 和 n 为拟合常数, 本文分别取 2 和 -0.1。

将式(11)代入式(9)中, 可得

$$\lg N(M) = a_L + 0.1 \cdot b_L - 2b_L M = a - bM \quad . \quad (12)$$

如果认为 b_L 所描述的震源机制是正确的, 那么应力迁移型地震活动对应 b 值为 2.4~3.0, 断层滑移型对应 b 值通常小于 1.6。岩体稳定性恶化的过程, 伴随着高震级事件增多或低震级事件减少, b 值降低^[21]。

由式(8)、(10)、(12)可得

$$\lg N(E) = a + \frac{2b}{3d}(c + 9d) - \frac{2b}{3d} \lg E \quad . \quad (13)$$

式(13)表示微震能量-频度关系, 由能量-震级和震级-频度关系推导得来, 式中 $N(E)$ 的定义可参考 $N(M_L)$; 记 $b_e = 2b/3d$, 表征岩体的变形特性。在相同震源机制作用下, b_e 值减小, 伴随着岩体高震级事件增多或低震级事件减少, 岩体变形驱动力升高, 导致岩体微破裂变形增大。当 $\lg N$ 趋近于零时, 对应 E 值为该状态下可能出现微震事件的最大能量。

综上分析, 可以利用矩震级代替地方性震级来表征微震震源机制, 边坡岩体微震能量-频度统计关系可以用于研究边坡微破裂变形特性及其稳定性演化进程, 从而进行抗剪洞加固效果的评价。

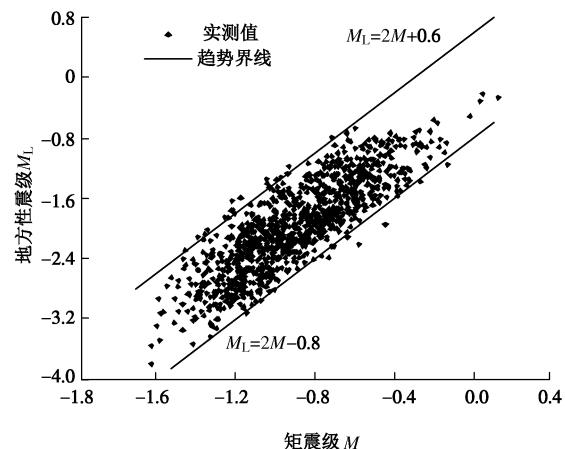


图 5 右岸边坡微震事件地方性震级与矩震级关系图

Fig. 5 Relationship between local magnitude and moment magnitude of microseismic events of right bank slope

3 抗剪洞加固效果分析

3.1 微震活动性时间分布特征

大岗山右岸边坡微震监测系统自 2010 年 5 月 4 日开始运行监测, 截止 2012 年 5 月 31 日, 距离抗剪洞布设位置 20m 以内的抗剪洞加固区域内岩体微震累积能量和事件频率随时间分布规律如图 6 所示。2010 年 8 月, 2011 年 5 月—7 月的微震活动性较强, 边坡岩体微震累积能量释放增长也较快, 其中 2010 年 8 月与 2011 年 7 月微震累积能量释放变化曲线斜率明显变大, 却滞后于该时间内的高微震活动性, 说明边坡抗剪洞等洞室开挖诱发该区域出现高能量事件。2011 年 9 月以后, 抗剪洞加固区域微震事件活动率有所降低, 至 11 月以后明显降低, 微震事件能量较低, 累积能量增长缓慢, 说明回填加固完成后的抗剪洞抑

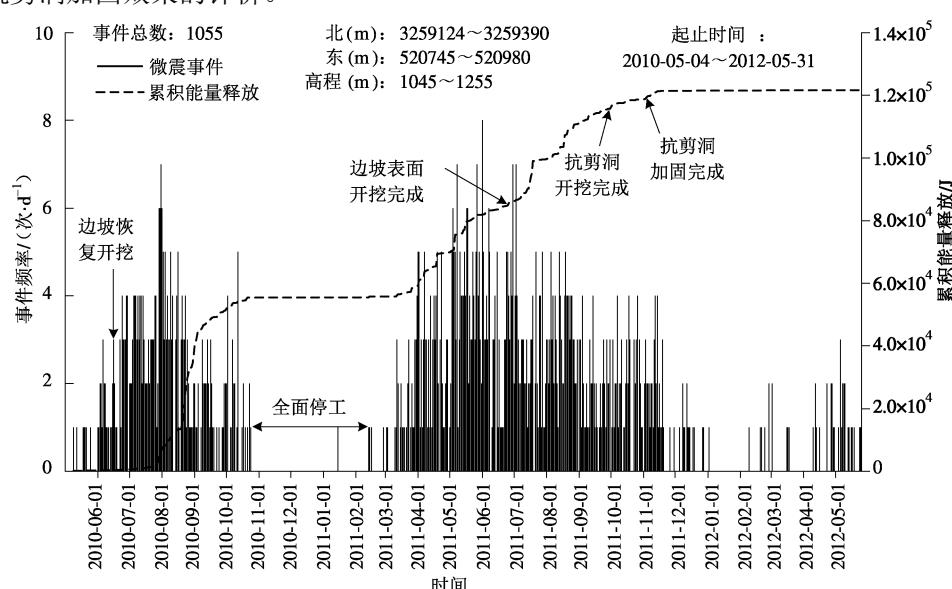


图 6 抗剪洞加固区微震累积能量和事件频率随时间分布图

Fig. 6 Accumulative energy of microseismic events and activity rate along with time in the anti-shear tunnel area

制了边坡微破裂的发展。

3.2 抗剪洞加固前后岩体微震能量密度

选取2010年5月4日至2011年9月30日和2011年11月1日—2012年5月31日右岸边坡微震监测数据, 绘制抗剪洞加固前后边坡能量密度沿剖面分布图

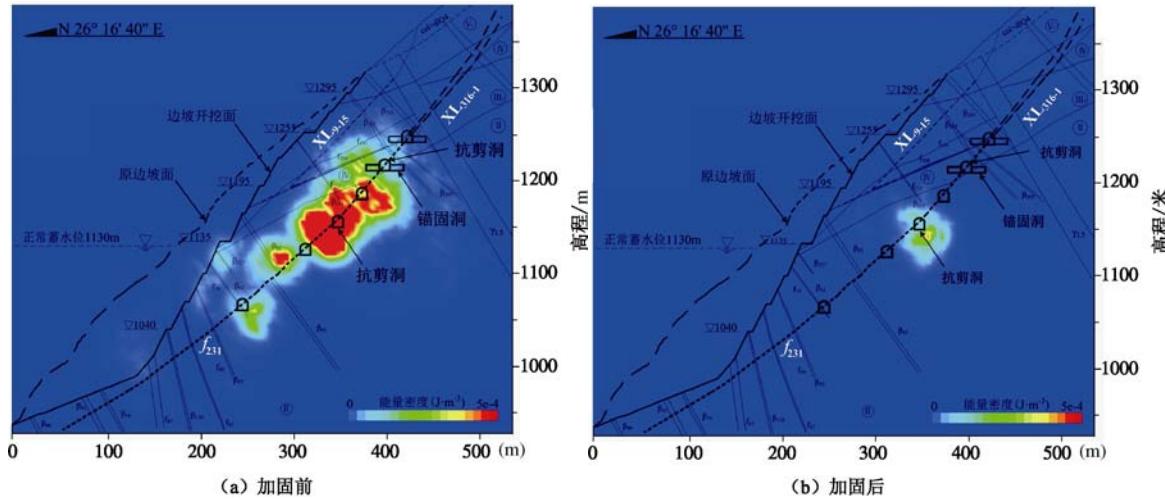
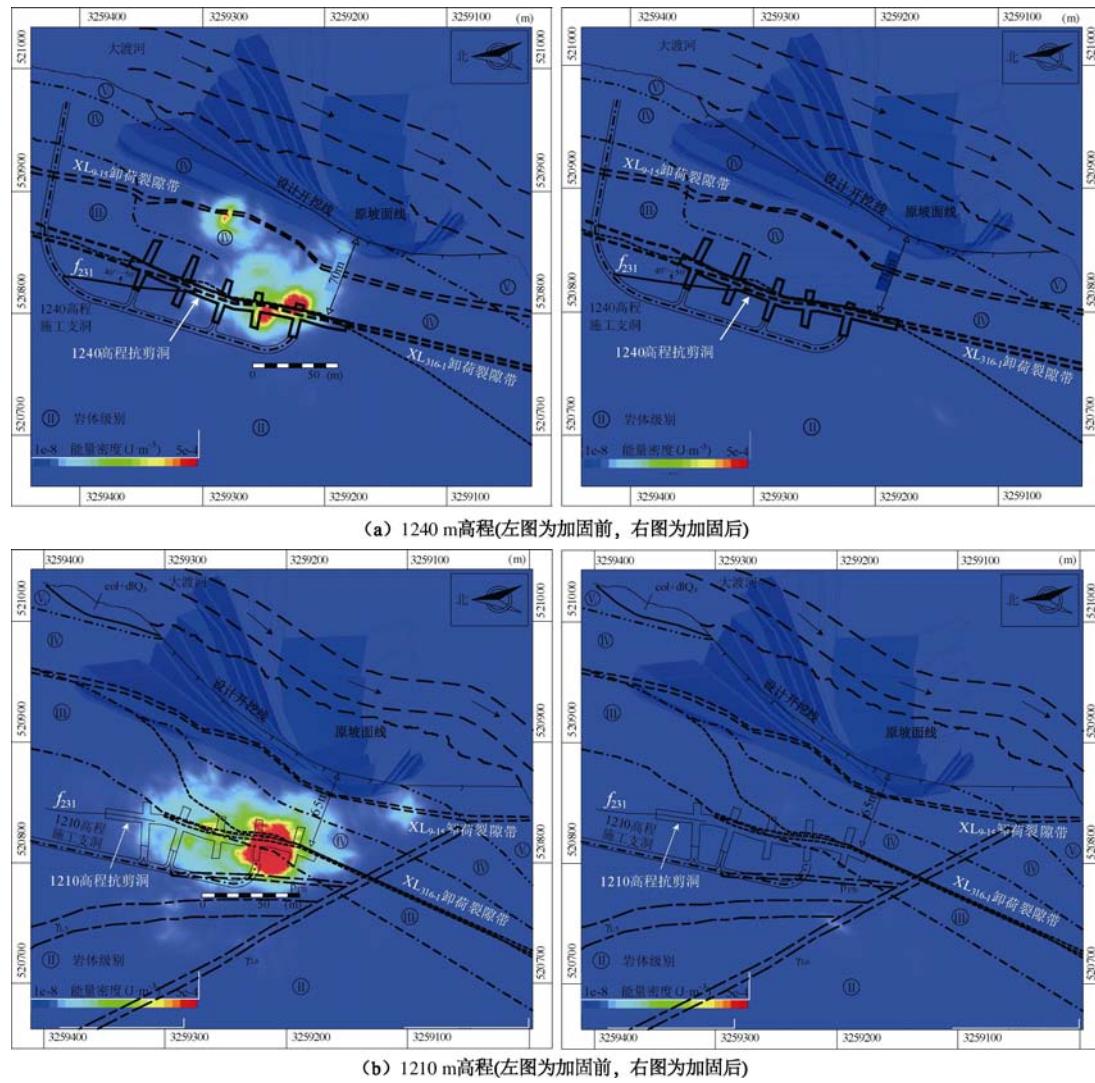


图7 边坡能量密度剖面V—V分布图

Fig. 7 Microseismic energy density in section V—V of slope



(图7) 和沿不同高程分布图(图8, 9), 并将抗剪洞位置、主要结构面逐一投影到对应能量密度图上。由图7可以发现, 边坡剖面高能量释放区在抗剪洞加固前(边坡开挖期间)主要沿卸荷裂隙带XL₃₁₆₋₁、 f_{231} 断层和1070~1135 m高程边坡开挖面分布。抗剪洞加

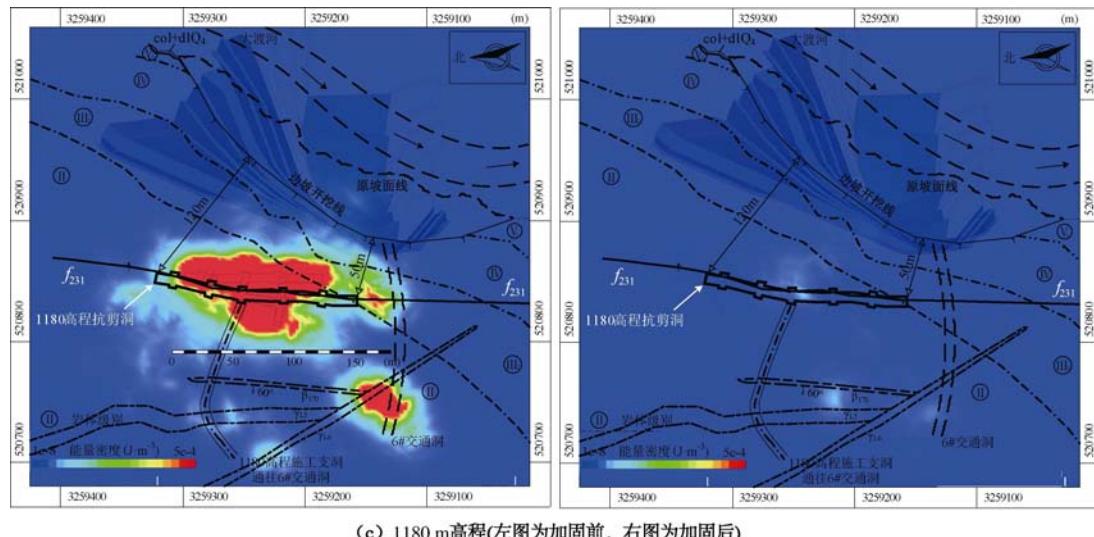
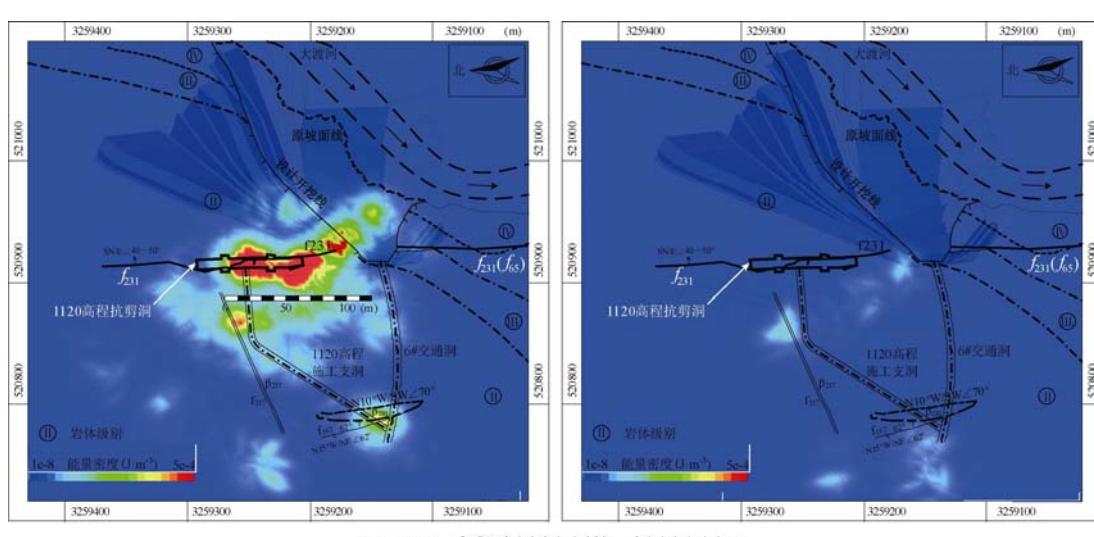
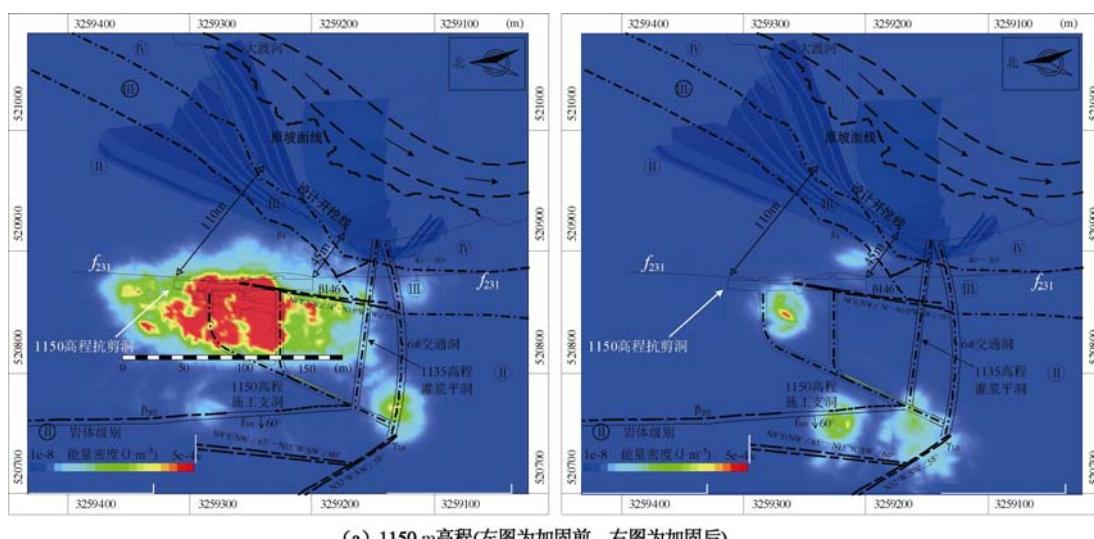


图8 抗剪洞加固前后 1240, 1210 和 1180 m 高程微震能量密度分布对比

Fig. 8 Comparison between microseismic energy density at 1240, 1210 and 1180 m before and after reinforcement of anti-shear tunnels



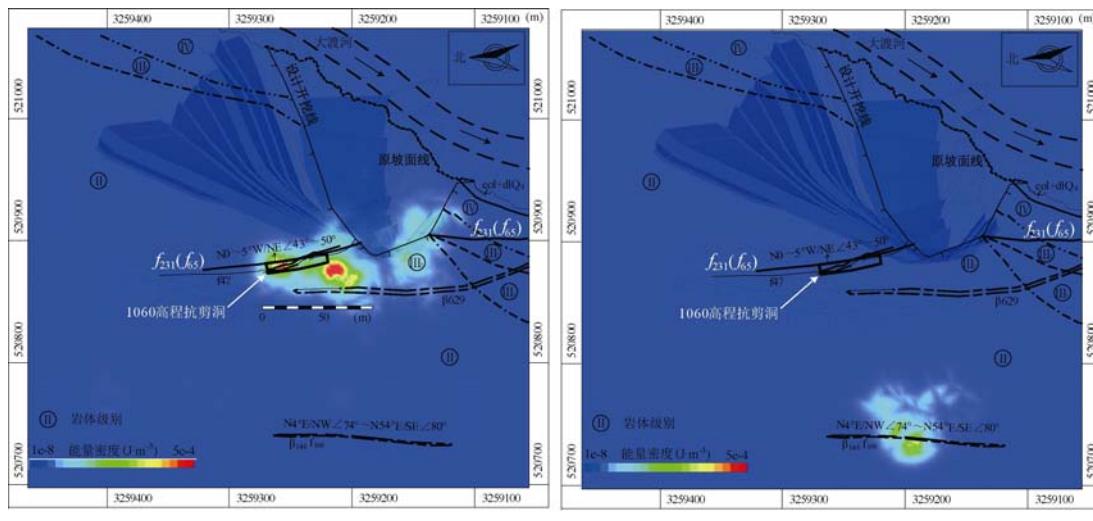


图9 抗剪洞加固前后 1150, 1120 和 1060 m 高程微震能量密度分布对比

Fig. 9 Comparison between microseismic energy density at 1150, 1120 and 1060 m before and after reinforcement of anti-shear tunnels 固以后, 边坡微震能量密度明显降低, 高能量释放区转移至 1150 m 高程抗剪洞里侧边缘。

由图 8, 9 可以看出, 抗剪洞加固前: 1240 m 高程抗剪洞南侧两排锚固洞之间岩体微震能量密度较高, 距离边坡面约 60 m; 1210 m 高程高能量释放区位于抗剪洞南侧两排锚固洞之间, 呈现向北延伸的趋势, 距离边坡面约 50 m; 1180 m 发育两处高能量释放区, 分布面积近 5000 m², 距离坡面最近达 30 m; 1150 m 高程抗剪洞与施工支洞围成区域是微震能量释放集中区域, 距离边坡面约 60 m; 而 1120 m 高程高能量释放区沿抗剪洞由施工支洞向南延伸至边坡表面; 1060 m 高程抗剪洞北侧和西南端微震能量密度较高, 总体沿抗剪洞走向展布。上述各高程高能量释放区主要是由于边坡爆破开挖致使边坡卸荷裂隙密集 XL₃₁₆₋₁、XL₀₉₋₁₅、 f_{231} 断层、花岗细晶岩脉 γ_{16} 及辉绿岩脉破碎带 β_{170} 等发生扰动产生微破裂萌生和聚集而形成的。

右岸边坡 6 层抗剪洞加固完成后 7 个月内, 各高程岩体微震能量密度明显降低(图 8, 9)。1180 m 高程抗剪洞中部靠坡外侧和辉绿岩脉破碎带 β_{170} 中部岩体微震能量密度相对较高; 1150 m 高程抗剪洞与上游侧施工支洞交汇处, 深部辉绿岩脉 β_{202} 处均出现高能量释放区; 1120 m 高程辉绿岩脉破碎带 β_{217} 东段, 深部 f_{167} 断层处发生局部微破裂聚集; 1060 m 高程在深部辉绿岩脉 β_{146} 和 f_{167} 断层发育高能量释放区, 距离边坡面超过 200 m。因此, 抗剪洞加固后边坡岩体整体能量密度明显降低, 边坡相对高能量释放区向抗剪洞边缘和边坡深部岩脉破碎带、断层等位置转移, 边坡受力状态明显改善。

抗剪洞加固前的边坡高能量释放区是岩体微破裂

集中和岩体损伤区域, 抗剪洞应尽量置换上述岩体高能量释放区, 锚索应穿过岩体损伤区。1240, 1210, 1120, 1060 m 高程抗剪洞基本覆盖了高能量释放区, 针对性较强; 1180, 1150 m 高程抗剪洞虽然穿过高能量释放区, 但考虑岩体损伤范围较大, 建议 1180 m 高程锚索设置应大于 50 m, 使锚固端落在抗剪洞内或损伤区外的坚硬岩体上, 1150 m 高程抗剪洞向北延伸 30~40 m, 覆盖高能量释放区, 以增强边坡蓄水运营期间的抗变形能力。抗剪洞加固后, 3 个高高程微震能量密度降低更加明显, 3 个低高程的高能量释放区向边坡深部转移, 6 个高程抗剪洞能够很好地发挥加固和传力作用。

3.3 能量、震级、频度关系分析

为了研究边坡岩体在抗剪洞加固前后的震源机制、变形特征及其稳定性演化进程, 根据式(12)、(13), 选取自 2010 年 5 月 4 日分别至 2010 年 10 月 20 日、2011 年 9 月 30 日和 2012 年 5 月 31 日, 以及抗剪洞加固后的 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 5 月 31 日的抗剪洞加固区岩体的微震能量和矩震级, 采用线性最小二乘拟合求取震级-频度和能量-频度关系曲线的斜率, 见图 10, 11。由图 10(a)、(b) 可以看出, 抗剪洞加固区在边坡开挖期间 b 值大于 2.4, 而加固以后此区域岩体 b 值小于 1.6, 可以认为抗剪洞加固区岩体在边坡开挖期间主要发育应力迁移型微震事件, 加固以后以低频度小震级的断层滑移型事件为主。抗剪洞加固以后, 边坡岩体受力性能明显改善。但二者之间由于震源机制的不同, b_c 的变化与岩体微破裂的破裂变形之间的关系尚不明确, 有待进一步研究。

对比图 10(a)、11(a)、11(b), 抗剪洞加固区岩体在边坡开挖期间 b 值由 2.95 小幅降低为 2.75, 并在抗剪洞加固后, 增加至 3.06。整个过程中岩体微震事

件以应力迁移型事件为主, b_e 值经历 1.27 到 1.18, 随后至 1.32 的变化, 对应的各状态下可能的微震事件最大能量先增加后降低。上述变化表明抗剪洞加固区岩体在边坡开挖期间的稳定性存在下降趋势, 微破裂变形增大, 灾害风险增大, 而在抗剪洞加固后, 微破裂变形得到抑制, 灾害风险也有所降低, 说明大岗山右岸边坡抗剪洞取得了一定的加固效果。

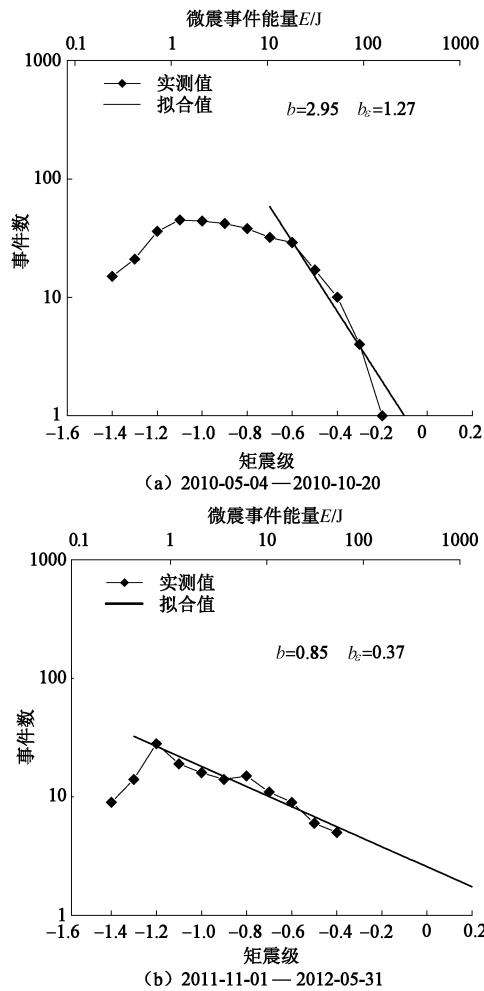
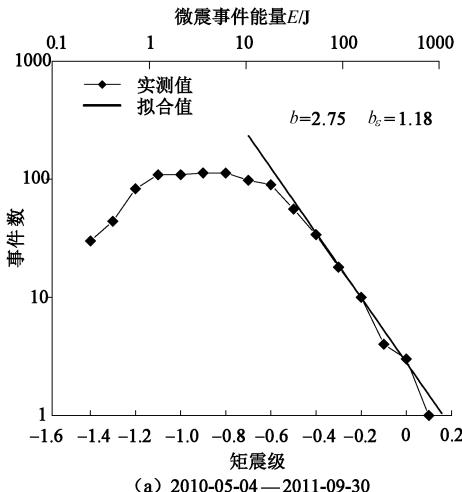


图 10 不同时期加固区岩体微震能量、震级和频度关系曲线

Fig. 10 Energy-magnitude-frequency relation curves for microseismic events in reinforced area during different periods



(a) 2010-05-04—2010-10-20

微震事件能量 E/J

事件数

-1.6 -1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2

矩震级

$b=2.95 \quad b_e=1.27$

微震事件能量 E/J

事件数

-1.6 -1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2

矩震级

$b=0.85 \quad b_e=0.37$

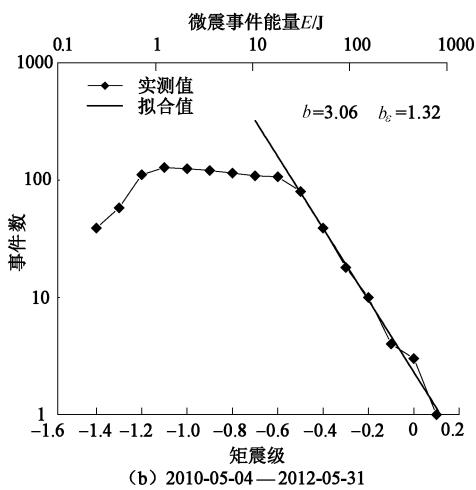
微震事件能量 E/J

事件数

-1.6 -1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2

矩震级

(b) 2011-11-01—2012-05-31



(b) 2010-05-04—2012-05-31

图 11 加固前后微震能量、震级和频度关系曲线

Fig. 11 Energy-magnitude-frequency relation curves for microseismic events before and after reinforcement of anti-shear tunnels

3.4 变形监测数据分析

根据右岸边坡的变形破坏模式, 建立浅表部和深部卸荷裂隙相结合的变形监测系统, 与微震监测共同评价边坡的稳定性。图 12 为 1136 m 高程多点位移计变形过程曲线^[5], 2009 年 4 月—8 月和 2010 年 7 月测点位移增长较快, 2011 年 11 月后, 测点位移逐步减缓, 并基本收敛。边坡浅表部变形在开挖期间增加明显, 抗剪洞加固完成后逐步收敛。2010 年 7 月—2011 年 2 月, 勘探平硐 PD09 (1255 m 高程) 穿过 XL₃₁₆₋₁ 处错动变形 14.4 mm, 占总变形的 52.2%, 2011 年 11 月后, 随着抗剪洞支护完成, 变形逐步收敛^[22]。深部卸荷裂隙的变形主要发生在边坡开挖期间, 抗剪洞加固完成后, 深部裂隙的变形得到抑制, 这与抗剪洞加固前后 b_e 值变化所反映的微破裂变形特性是一致的。边坡变形监测结果很好地验证了通过能量密度及 b_e 值变化特征来评价抗剪洞加固效果的正确性。

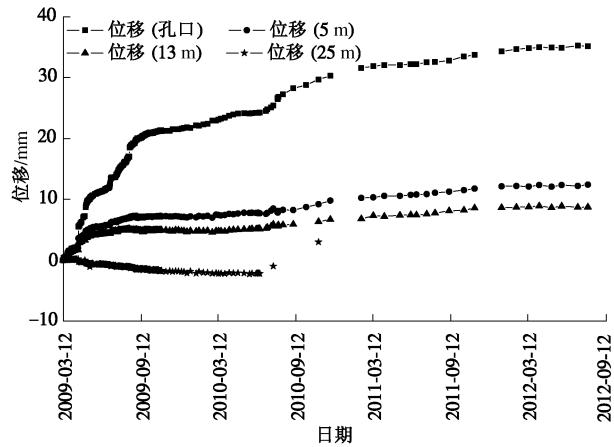


图 12 右岸边坡 1136 m 高程多点位移计过程线

Fig. 12 Process curves of multipoint displacement meters at EL.1136 m of right bank slope

4 结 论

(1) 边坡岩体微震能量密度 E_d 不仅可以综合反映边坡微破裂的位置和强度, 圈定边坡开挖损伤区和潜在危险区域, 还能进一步揭示震源区岩体应变能的储存及释放的进程, 探究外界扰动作用下边坡岩体的状态。

(2) 结合微震能量密度和能量 - 频度关系, 不仅可以阐述边坡岩体微震能量转移特征, 圈定边坡潜在危险区域的发展, 而且能够揭示加固前后边坡岩体变形特性及其稳定性演化进程, 更加全面地评价抗剪洞的加固效果。

(3) 边坡抗剪洞加固后边坡岩体微震事件活动率和各高程岩体微震能量密度均明显降低, 边坡中相对高能量释放区向抗剪洞边缘及危险性较低的边坡更深处断层及岩脉转移, 边坡受力性能明显改善。

(4) 边坡开挖期间能量、震级和频度关系中 b_e 值和 b 值均小幅降低, 并在抗剪洞加固后有所增加, 表明抗剪洞加固区岩体在边坡开挖期间存在稳定性下降, 破裂变形增大的趋势。而在抗剪洞加固以后, 微破裂变形得到抑制, 边坡灾害风险不断降低, 这与边坡浅表部和深部卸荷裂隙的变形监测结果是一致的, 边坡抗剪洞加固取得了较好的效果。

本文提出的微震能量密度和能量 - 频度关系, 及其在大岗山右岸边坡抗剪洞加固效果评价中的应用, 可以为复杂地质条件下岩石高边坡微震监测设计、加固措施选择及其效果评价提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525 – 1544. (HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525 – 1544. (in Chinese))
- [2] 邬爱清, 朱杰兵, 付敬, 等. 三峡工程永久船闸中隔墩岩体变形全过程测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1649 – 1653. (WU Ai-qing, ZHU Jie-bing, FU Jing, et al. Research on deformation measurement of whole process for the middle rock wall of the permanent ship lock at TGP[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S0): 1649 – 1653. (in Chinese))
- [3] 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 Wei-ya, ZHENG Wen-tang, 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))
- [4] 漆祖芳, 姜清辉, 唐志丹, 等. 锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工期稳定分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 531 – 538. (QI Zu-fang, JIANG Qing-hui, TANG Zhi-dan, et al. Stability analysis of abutment slope at left bank of Jinping-I hydropower project during construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 531 – 538. (in Chinese))
- [5] 黎满林, 卫蔚, 张荣贵. 大岗山右岸边坡卸荷裂隙密集带加固及稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2276 – 2282. (LI Man-lin, WEI Wei, ZHANG Rong-gui. Stability evaluation and reinforcement of unloading fissures in right bank of Dagangshan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2276 – 2282. (in Chinese))
- [6] 马克, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测与数值模拟的大岗山右岸边坡抗剪洞加固效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1239 – 1247. (MA Ke, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. The effect analysis of the Dagangshan right bank slope anti-shear tunnel reinforcement based on microseismicity monitoring and numerical analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1239 – 1247. (in Chinese))
- [7] 徐奴文, 唐春安, 吴思浩, 等. 微震监测技术在大岗山水电站右岸边坡中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊): 216 – 221. (XU Nu-wen, TANG Chun-an, WU Si-hao, et al. Application of microseismic monitoring technique in the right bank slope of Dagangshan hydropower station[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(S0): 216 – 221. (in Chinese))
- [8] 于群, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2315 – 2322. (YU Qun, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2315 – 2322. (in Chinese))
- [9] 马克. 开挖扰动条件下岩质边坡灾变孕育机制、监测与控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (MA Ke. Study on the potential failure mechanism, monitoring and controlling methods of rock slope under excavation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [10] SNELLING P E, LAURENT G, MCKINNON S D. The role

- of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **58**(2): 167 – 179.
- [11] BOATWRIGHT J, FLETCHER J B. The partition of radiated energy between P and S waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, **74**(2): 361 – 376.
- [12] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods (Vol I and II)[M]. San Francisco: WH Freeman and Co, 1980.
- [13] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London: Chapman & Hall, 1996: 181 – 186.
- [14] GIBOWICZ S J, KILKO A. An introduction to mining seismology[M]. San Diego: Academic Press Inc, 1994: 2 – 8, 15 – 22.
- [15] SENATORSKI P. Apparent stress scaling and statistical trends[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2007, **160**(3): 230 – 244.
- [16] MENDECKI A J, VAN ASWEGEN G. Seismic monitoring in mines: selected terms and definitions[C]// Proceedings of Rockbursts and Seismicity in Mines—RaSiM5. Johannesburg, 2001: 563 – 570.
- [17] 徐奴文, 戴 峰, 周 钟, 等. 岩质边坡微震事件 b 值特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 3868 – 3874. (XU Nu-wen, DAI Feng, ZHOU Zhong, et al. Study of Characteristics of b value for microseismic events in high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 3868 – 3874. (in Chinese))
- [18] 李全林, 于 涛, 郝柏林, 等. 地震频度 – 震级关系的时空扫描[M]. 北京: 地震出版社, 1979: 109. (LI Quan-lin, YU Tao, HAO Bo-lin, et al. Tempo-spatial scanning of earthquake frequency magnitude relation[M]. Beijing: Seismological Press, 1979: 109. (in Chinese))
- [19] 陈运泰, 刘瑞丰. 地震的震级[J]. 地震地磁观测与研究, 2004, **25**(6): 1 – 12. (CHEN Yun-tai, LIU Rui-feng. Earthquake magnitude[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2004, **25**(6): 1 – 12. (in Chinese))
- [20] HANKS T C, KANAMORI H. A moment magnitude scale[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, **84**: 2348 – 2350.
- [21] WANG C L, WU A X, LIU X H, et al. Study on fractal characteristics of b value with microseismic activity in deep mining[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, **1**(1): 592 – 597.
- [22] 王悌剖, 王界雄, 董瑜斐. 大岗山水电站卸荷裂隙密集带对高陡边坡稳定性的影响与分析[J]. 长江科学院院报, 2014, **31**(11): 87 – 91. (WANG Di-kai, WANG Jie-xiong, DONG Yu-fei. Effects of dense unloading fissures belt on the stability of high and steep slope of Dagangshan hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, **31**(11): 87 – 91. (in Chinese))

第三届地基处理和地基控制技术国际会议预告

会议背景: 地基处理和地基控制技术是目前岩土工程学科的重要研究领域, 我国长三角广泛分布的软基工程以及滨海地区大规模的围海造地工程为地基处理和控制的理论和技术研究提供了广阔的舞台, 同时也促进着我国在相关研究和应用领域赶超世界领先水平。本次会议旨在为了进一步加强各国在该领域的学术交流与合作, 促进地基处理和控制技术的理论研究和工程应用, 有效提升我国在地基处理领域中的学术地位及国际影响力。

主办单位: 浙江工业大学。

时间、会场: 2017年10月27—10月29日; 地点: 杭州之江饭店。

参会代表: 会议主席 Cai Yuanqiang, Zhejiang University of Technology, China; 国际评委委员会主席 Buddhima Indraratna, University of Wollongong, Australia; 本地组织委员会主席 Gong Xiaonan, Zhejiang University, China。

本次会议境外参会代表多、来自全球各个地区, 扩大了我校的国际影响力。会议详细信息参见: www.icgi2017.org。

(会议组委会 供稿)