

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.025

基于离散元模拟和微震监测的白鹤滩水电站 左岸岩质边坡稳定性分析

徐奴文¹, 李 韬¹, 戴 峰¹, 李 彪¹, 樊义林², 徐 剑²

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘 要: 西南地区水电站复杂高陡边坡的开挖稳定性一直是水电工程建设的关键技术问题之一。在研究金沙江白鹤滩水电站左岸边坡地形地貌、工程地质特性、地应力实测资料等基础上, 利用通用离散元程序 UDEC 建立左岸顺层边坡离散元模型, 进行开挖卸荷过程坝基边坡的稳定性分析, 获得边坡开挖过程应力场、位移场、塑性区分布规律, 揭示了顺层岩质边坡变形失稳机制。同时, 结合左岸边坡开挖卸荷和应力调整过程微震活动特征, 识别和圈定了左岸边坡深部岩体潜在损伤区域和滑裂面。综合研究结果表明, 左岸边坡变形主要受构造应力、地质条件和开挖卸荷等综合因素影响, 其中软弱结构面 LS₃₃₁₈、LS₃₃₁₉、LS₃₃₁、LS₃₃₇、F₁₇ 等对坝基边坡开挖变形起决定性作用。研究成果可为左岸边坡开挖和支护施工提供参考, 同时也为类似顺层岩质边坡工程开挖支护提供研究思路。

关 键 词: 岩质边坡; 数值模拟; 离散元; 微震监测; 稳定性

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017)08—2358—10

Stability analysis on the left bank slope of Baihetan hydropower station based on discrete element simulation and microseismic monitoring

XU Nu-wen¹, LI Tao¹, DAI Feng¹, LI Biao¹, FAN Yi-lin², XU Jian²

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing, 100038, China)

Abstract: In southwestern of China, the stability problem of the complex high slopes subjected to excavation has become one of the key technical problems in the hydropower project construction. Based on the geomorphic conditions, characteristics of geologic framework and stress measurement data of the left bank slope of Baihetan hydropower station, by using the discrete element analysis procedure UDEC, a calculation model was established to study the stability of the left bank slope during excavation unloading. The principal stress field, deformation field and plastic yielded zones distribution law were studied under the condition of excavation, then the deformation mechanism of the left bank bedding rock slope has been declared. Meanwhile, the potential damage zone and critical sliding surface in deep rock mass were identified and delineated, by combination with the microseismic activity at the left bank slope during the periods of excavation and stress redistribution. The comprehensive studies indicated that the deformation of the left bank slope is mainly affected by multiple factors, such as tectonic stress, geological structure and unloading. The weak structure planes, such as LS₃₃₁₈, LS₃₃₁₉, LS₃₃₁, LS₃₃₇ and F₁₇, play a decisive role in the excavation deformation of the left bank slope. The research results can provide valuable references for excavation and reinforcement of similar bedding rock slope projects.

Keywords: rock slope; numerical simulation; distinct element; microseismic monitoring; stability

1 引 言

我国是一个水能资源非常丰富的国家, 据统计, 水力资源蕴藏量高达 6.9×10^8 kW, 其中技术可

开发利用的资源量为 5.7×10^8 kW, 主要集中分布在环青藏高原周边地区的河流, 居世界之首^[1]。随着西南地区一批大型水电工程相继开工建设。这些大型水电站大多修建在地质条件复杂的高山峡谷地

收稿日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51679158); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (No. 2015CB057903)。

This work supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51679158) and the National Program on Key Basic Research Project of China (No. 2015CB057903).

第一作者简介: 徐奴文, 男, 1981 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程灾害机理与微震监测方面的教学与研究工作。E-mail: xunuwen@scu.edu.cn

区, 涉及到 200~300 m 级的高坝, 不可避免需要对高陡岩质边坡进行开挖。由于边坡具有坡型、应力环境复杂, 地应力量级高以及复杂的变形破裂演化历史等特征。因此, 工程中岩质高陡边坡的稳定性及灾害治理问题已经成为我国西部地区人类活动及工程建设中的重要工程地质和岩石力学问题^[2]。

自 20 世纪 80 年代以来, 随着计算理论和计算机科学的长足发展, 数值模拟技术已广泛应用于高陡岩质边坡的稳定性研究, 目前主要有有限元法、有限差分法、边界元法、离散元法和块体理论方法。国内外学者采用不同的数值方法对众多边坡进行稳定性分析和失稳预测, 取得了一系列的研究成果。Griffiths^[3]、Dawson^[4]、CHENG^[5]等采用有限元法对诸多边坡工程稳定性及破坏机制进行研究分析。郑颖人等^[6-7]通过使用有限元强度折减法对各类岩质边坡破坏机制进行数值模拟, 论证了强度折减法在岩质边坡稳定性分析方面的适用性。平瞳其等^[8]利用扩展有限元法模拟岩质边坡内部裂隙在地震作用下的开裂扩展, 采用矢量和法分别计算了不同工况下边坡安全系数, 分析了裂隙扩展对边坡稳定性影响。徐奴文等^[9-10]运用 RFPA 程序对锦屏一级水电站左岸边坡的破坏过程进行了详细的计算和分析, 直观得出边坡潜在滑裂面及安全系数。但边坡在开挖卸荷时, 变形常由断层、裂隙、节理等不连续结构面控制, 有限元连续变形分析方法不能较好地考虑结构面的作用, 而采用不连续介质力学理论数值分析方法进行岩质边坡稳定性分析具有一定优越性, 离散元软件 UDEC 在处理非连续性变形问题和结构面控制型岩体稳定问题上具有显著优势, 能够方便地模拟各类地质构造面^[11]。文献[12-13]将强度折减法与离散元 UDEC 相结合对节理岩质边坡稳定性进行了研究; 文献[14-17]利用离散元软件对高陡岩质边坡进行数值计算分析, 在边坡工程分析中具有很好的借鉴意义。

高陡岩质边坡的稳定性分析除数值模拟之外, 现场监测也是有效的研究方法之一。常规监测方法能够对岩土工程外观变形进行监测, 但对岩体内部微破裂及其演化过程难以进行有效的监测^[18]。对于常规监测方法 (GPS、多点位移计、石墨收敛计、测斜仪等)^[19-21]大都进行“点”、“线”式的局部监测。微震监测作为一种先进和行之有效的监测手段, 在三维空间范围内实时“体”的整体监测, 根据微破裂的大小、集中程度、破裂密度, 揭示岩体内部微破裂萌生、发育、扩展、贯通直至岩体宏观失稳破坏的发展趋势, 在水电工程中地下厂房洞

室^[18, 22]、引水隧洞^[23-24]、高陡边坡^[25]取得了诸多成果, 有效地对开挖卸荷岩体稳定性进行评估和预测。

本文在上述研究的基础上, 针对白鹤滩水电站左岸顺层岩质边坡工程中出现的问题, 采用 UDEC 数值计算与现场微震监测的综合分析方法, 准确圈定和识别边坡在开挖卸荷条件下潜在的失稳区域和危险滑动面, 对左岸边坡破坏失稳机制及其稳定性进行研究与评价。研究结果可为左岸边坡开挖和支护施工提供参考, 也为类似的顺层岩质边坡工程提出一种合理高效的稳定性分析思路。

2 工程概况与地质条件

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内, 距上游乌东德水电站坝址 182 km, 下游溪洛渡水电站 195 km。电站装机容量为 14 004 MW, 多年平均发电量为 $6.02 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。左岸为大凉山山脉东南坡, 山峰高程为 2 600 m, 整体上呈向金沙江倾斜的斜坡地形, 谷坡平缓, 河谷较宽; 右岸陡峻, 河谷呈不对称的“V”字型^[26]。

左岸边坡高程为 834~628 m, 坝基岩性为 $P_2\beta_4^2 \sim P_2\beta_3^3$ 层玄武岩, 是典型的顺向坡岩层结构, 其中柱状节理玄武岩分布于 660~628 m 段, 属 $P_2\beta_3^3$ 层第 1 类柱状节理玄武岩, 长度一般为 3 m, 直径为 15~25 cm, 柱体内断口发育, 断口间嵌合紧密。坝基主要出露断层、层间错动带、层内错动带、构造裂隙等地质构造, 规模较大的有 F_{14} 、 F_{16} 和 F_{17} 断层, 其中 F_{17} 最大宽度为 3 m, 在地表的延伸距离达 1 km 以上, 在中低高程形成侧裂面。边坡内部沿岩层走向发育 C_{3-1} 、 C_3 层间错动带以及 LS_{331} 、 LS_{337} 、 LS_{3318} 等多条层内错动带, 构成不同高程的底滑面, 都受 F_{17} 断层的限制。同时, 在上部高程发育倾角较大的 f_{108} 、 f_{110} 较大规模断层, 与多条软弱错动带相互切割形成多个块体。图 1 为坝址区工程地质剖面概化图。左岸边坡第 1 主应力方向与岩层倾向基本一致, 方向为 $N40^\circ W$, 倾角为 15° , 大小为 8~11 MPa; 第 2 主应力方向 $N12^\circ E$, 倾角 -48° , 大小为 7~9 MPa; 第 3 主应力方向 $N74^\circ E$, 倾角 -29° , 大小为 6~8 MPa。两岸地应力主要为低~中等应力水平^[26]。

左岸边坡开挖规模巨大, 软弱结构面在由上至下大体积开挖卸荷下逐渐揭露, 坡体变形及应力调整明显, 必然会引起断层及层间、层内错动带高应力区裂隙萌生、发育和扩展, 进而导致边坡宏观变形破坏 (见图 2)。

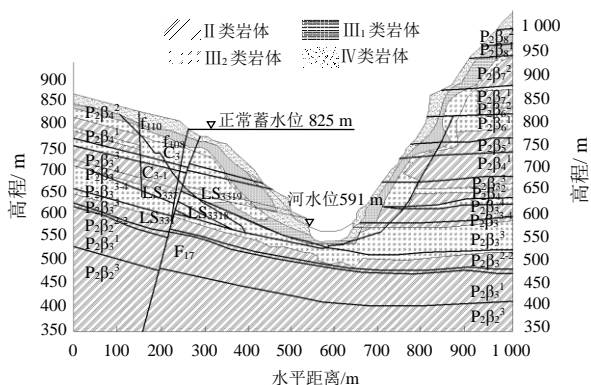


图1 坝址区工程地质剖面概化图^[26]
Fig.1 Schematic diagram of Baihetan dam geological profile

3 离散元数值计算

3.1 UDEC 基本原理

通用离散元程序 UDEC (Universal Distinct Element Code) 采用 Cundall 提出的离散单元理论^[27]。非连续介质通过离散的块体集合体来表示, 不连续面处理为块体间的边界面, 允许块体沿不连续面发生较大的位移和转动。块与块之间没有变形协调的约束, 只需满足平衡方程, 基于牛顿第二定律并结合不同本构方程, 变形可以是不连续的过程。可处理完全被节理切割以及不完全被节理切割的岩石, 能够模拟岩体的破坏、运动大位移^[28]。

变形块体材料模型的两个弹性常数 K 和 G 为

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

模型中岩石材料破坏基本准则是 Mohr-Coulomb 关系, f_s 为对应剪切破坏的线性破坏面函数:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (3)$$

式中: $N_\phi = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$; σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; ϕ 为内摩擦角; c 为黏聚力。

当 $f_s < 0$, 发生剪切屈服。

法向应力变为拉应力时, Mohr-Coulomb 准则失去意义, 屈服面扩展到 σ_3 等于其抗拉强度 σ_t 的区域。最小主应力不能超过其抗拉强度, 此时拉伸屈服函数 f_t 表示为

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_t \quad (4)$$



(a) 坝基下游 LS3320 表面裂缝



(b) 坝基表面局部松弛膨胀裂缝

图2 左岸边坡表面裂缝

Fig.2 Surface cracks of the left bank slope

当 $f_t > 0$, 发生张拉屈服。岩石抗拉强度不能超过 σ_t 的值, 最大值为

$$\sigma_{tmax} = \frac{c}{\tan \phi} \quad (5)$$

3.2 计算模型

选取左岸拱轴线剖面为分析对象, 边坡地表形态、岩层分区特性及主要地质构造依据地质勘测资料^[29]。图3为左岸坝基边坡剖面岩性分区及主要结构面图, 横河向为 570 m, 底部高程为 430 m, 最高点高程为 880 m。边坡岩体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。由于无厚度单元反映的结构面变形特征和破坏形态更为直观, 可更好地描述结构面的张开、压缩、剪切滑移现象, 模型中断层和错动带采用基于库仑剪切强度破坏准则的无厚度单元 Joint area contact-coulomb slip 模型。岩体和主要结构面的计算参数如表 1、2 所示^[29]。

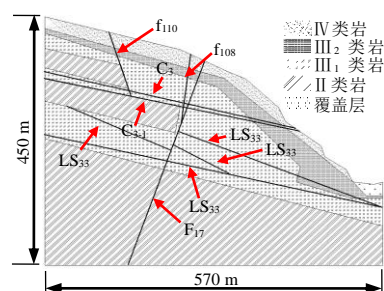


图3 数值模型材料分区及主要结构面

Fig.3 Location of the materials and main structural planes used in the UDEC model

表 1 不同岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of different rock mass

岩体类型	密度 ρ /(g/cm ³)	变形 模量 E /GPa	泊松比 ν	抗剪断强度	
				摩擦系数 f	黏聚力 c /MPa
覆盖层	2.20	0.06	0.35	0.5	0.35
IV类岩体	2.50	3.00	0.32	0.7	0.50
III ₂ 类岩体	2.60	8.00	0.27	0.9	0.75
III ₁ 类岩体	2.75	12.00	0.25	1.1	1.10
II类岩体	2.80	18.00	0.23	1.3	1.40

表 2 主要结构面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of main structural planes

结构面	总厚度 / cm	综合变形模量 E / GPa	抗剪断强度	
			摩擦系数 f	黏聚力 c /MPa
C ₃	60	0.71	0.39	0.10
C ₃₋₁	15	0.10	0.37	0.04
LS ₃₃₇	15	0.20	0.37	0.05
LS ₃₃₁	3	2.00	0.52	0.06
LS ₃₃₁₉	10	0.25	0.42	0.10
LS ₃₃₁₈	15	0.30	0.42	0.10
f ₁₁₀	50	0.60	0.50	0.15
f ₁₀₈	20	0.30	0.50	0.15
F ₁₇	240	2.00	0.50	0.15

左岸边坡开挖模型参见图 4，模型坐标系取 x 轴为横河向指向河谷， y 轴为竖直向上。计算域两侧施加 x 向约束，底部边界 x, y 向位移约束，地表为自由面，共生成块体 116 个，网格 33 730 个，节点 19 619 个。模型分为 16 个阶段从上至下开挖（开挖阶段由不同编号表示）。在不考虑支护情况下对边坡开挖卸荷过程进行数值模拟，并进行变形机制分析和稳定性评价。

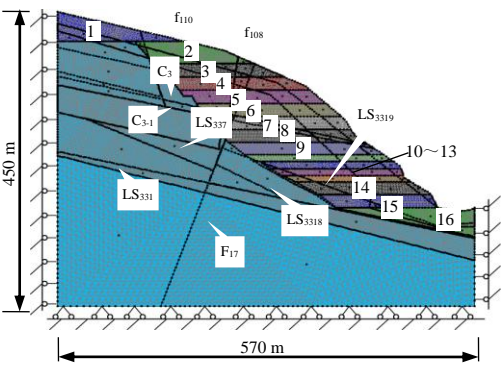


图 4 左岸边坡 UEC 数值模型
Fig.4 UDEC model of the left bank slope

3.3 数值计算结果与分析

通过试算得到与实测较为接近的初始地应力场^[30]，如图 5 所示，其中负值表示压应力，正值表示拉应力。

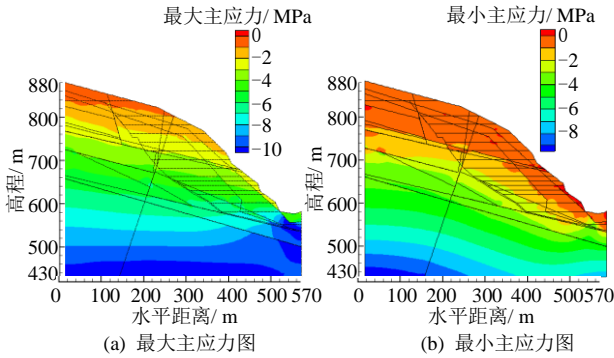


图 5 左岸边坡初始应力场分布
Fig.5 Initial stress fields of the left bank slope

根据初始地应力分布特征，边坡中、上部浅层近似为自重应力场，受从上至下开挖卸荷的影响，浅层部位总体应力逐渐降低，以铅直向应力调整为主。中、下部开挖过程中，受岸坡缓倾最大主应力的影响，开挖过程存在相对明显的水平向卸荷作用。截至 2015 年 7 月坝基开挖面高程为 628 m，LS₃₃₁₉ 上盘岩体处于临空状态，尖角部位在卸荷后出现明显应力松弛现象。在河谷部位开挖时，坡体地应力以水平应力为主，水平卸荷明显，坡脚处出现应力集中，开挖后坝基面应力松弛。图 6 给出了左岸边坡典型开挖步最大主应力分布情况。

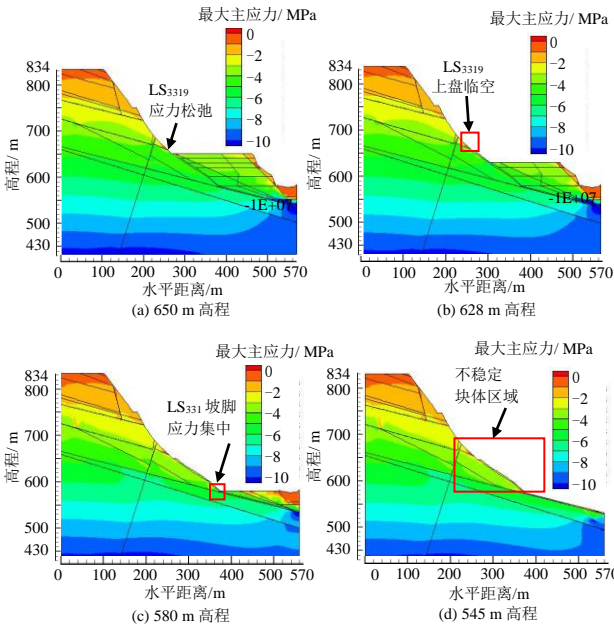


图 6 左岸边坡各典型开挖步最大主应力云图
Fig.6 Contour maps of the maximum principle stress of the left bank slope

对应的位移云图见 7(a)， x, y 方向分量如图 7(b)、7(c)所示。由图可知，中上部开挖时，坡体上部岩体被大体积挖除，卸荷总体以铅直向上的回弹

变形为主, 累计变形约为 2~4 cm, 水平向变形较小。开挖至 720~700 m 时, 性状较差的层间错动带 C_3 和 C_{3-1} 陆续出露, 受断层 f_{110} 的切割影响, 其上盘岩体沿错动带出现一定水平向变形, 量值约为 1 cm。随着开挖面高程降低水平向卸荷作用逐渐明显。开挖至 660~650 m 高程, 揭露层内错动带 LS_{3319} 岩体水平向变形逐渐增大。开挖面高程至 628 m 时, 性状较差, 上盘岩体较薄的 LS_{3319} 作底滑面, F_{17} 为侧裂面, 形成三角形切割体, 沿 LS_{3319}

出现较为明显的水平向滑移变形特征, 水平方向累计变形 1~2 cm, 与坝基 660 m 高程处 PSL2 排水洞喷射混凝土沿 LS_{3319} 层面方向出现向洞内发展的裂缝 (见图 8) 现象相对应。当边坡开挖完成后, 缓倾角层内错动带 LS_{331} 出露于河床, 受断层 F_{17} 影响, 其上盘岩体产生明显剪切滑移变形, 岩坎处的累计最大变形在 7.5 cm 左右, 水平分量为 7 cm, 竖直分量为 5 cm, 下盘岩体以开挖卸荷回弹变形为主, 变形量值较小。

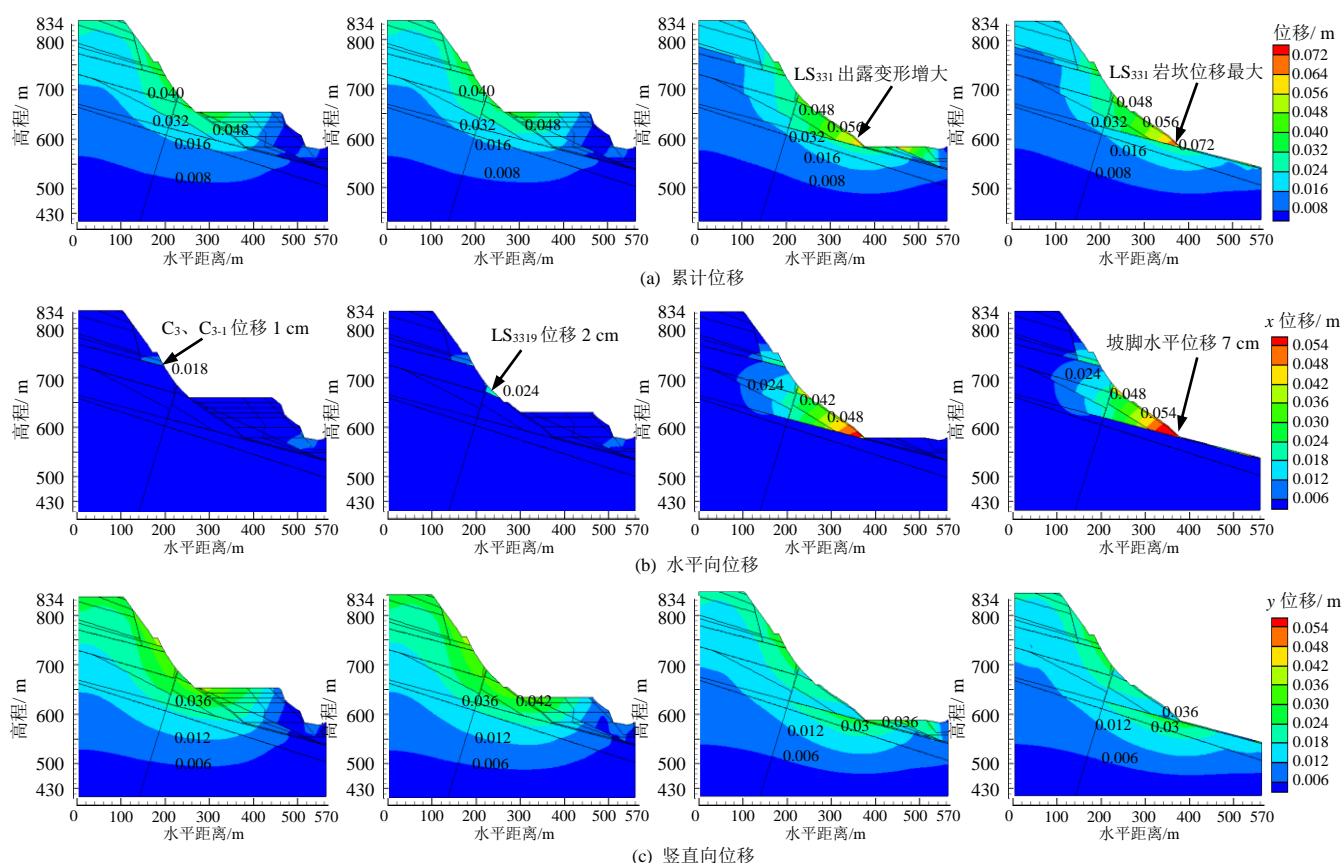


图 7 左岸边坡开挖变形位移云图

Fig.7 Deformation displacement contours of the left bank slope

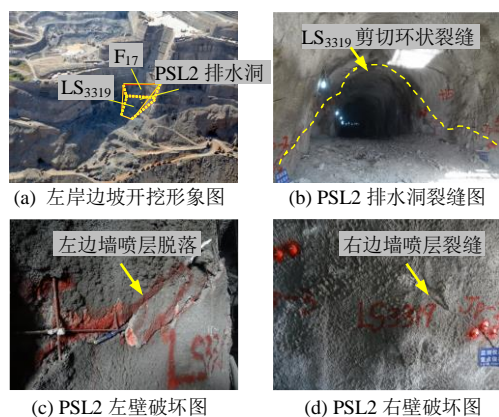


图 8 660.0 m 高程 PSL2 排水洞喷层裂缝
Fig.8 Shotcrete cracks of PSL2 drainage tunnel in the EL660.0 m

图 9 为左岸边坡塑性区分布, 在 650 m 高程及以下开挖阶段, 坝基开挖面主要为 III_1 和 II 类岩体, LS_{3319} 上盘岩体在开挖卸荷中出现应力松弛, 开始产生塑性屈服 (见图 9(a))。随着坝基开挖, 水平向卸荷逐渐明显, F_{17} 下盘岩体沿建基面出现塑性屈服现象, 坡面出现松弛鼓胀裂缝 (见图 9(c)对应图 2(b))。图 9(d)中临近河谷坝基岩体构造应力偏高, 导致浅层一定范围内坝基所在的 III_1 岩体沿层内错动带 LS_{331} 出现不同程度的应力松弛屈服, 在河谷区域较深处, 同时可以看到, 下部岩体的大体积卸荷对上部软弱结构面的变形屈服也有较大影响。

以上模拟结果表明, 白鹤滩水电站左岸边坡在

开挖卸荷作用下, 顺向坡的岩层结构有利于层内层间错动带及断层产生滑动和张裂变形, 主要结构面 LS_{3319} 、 LS_{3318} 、 LS_{331} 、 F_{17} 等是控制开挖变形和失稳的关键因素, 且主要变形部位与现场破坏情况有较好的对应关系。同时较高水平构造应力条件下, 左岸坝基开挖卸荷塑性屈服区分布情况与文献[29]中松弛屈服形式基本相似。因此, 对于此类结构面控制类型的顺层岩质边坡开挖稳定性问题需要特别关注, 并及时采取加固措施。

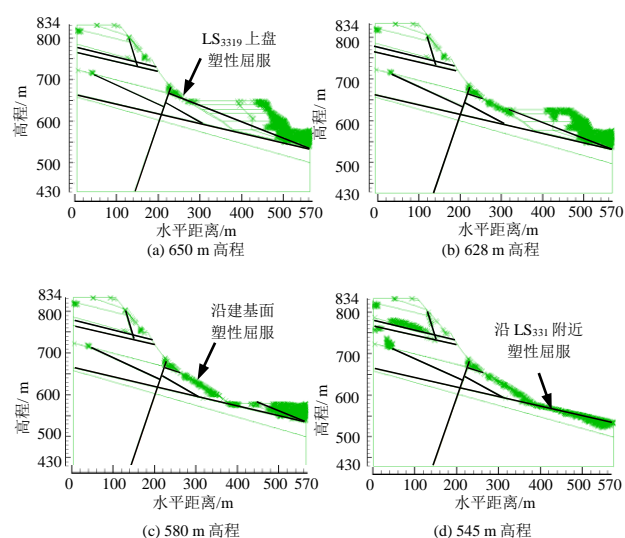


图9 左岸边坡塑性区分布

Fig.9 Distributions of plastic zones in left bank slope

4 边坡开挖卸荷微震活动特征分析

针对白鹤滩水电站左岸顺层岩质边坡开挖卸荷过程中层内、层间错动带变形问题, 2014 年 11 月四川大学在左岸坝基边坡引入加拿大 ESG (Engineering Seismology Group) 公司生产的矿山微震监测系统, 18 通道传感器分别安装在 3 个高程 (750、660、610 m) 灌排洞内, 在空间上呈阵列布设 (如图 10 所示, 图中 U、N、E 代表坐标轴方向 (U 为高程, N 为北向, E 为东向), S 表示传感器及其编号), 实现左岸边坡微震活动实时监测和分析。根据微震事件发生的时间、位置、能量大小等, 可以识别和圈定岩质边坡风险区域, 从而对坝基边坡稳定性做出评价预测。

2014 年 11 月~2015 年 1 月初建基面和灌排洞的开挖扰动造成大量岩石微破裂。图 11 为该时间段内左岸坝基边坡岩石微破裂事件空间分布规律和密度云图, 圆球代表微震事件, 颜色表示矩震级, 云图颜色越亮, 表示微震事件密度越大, 该区域边坡

内部岩石破裂情况越严重。在剔除爆破事件、机械噪音干扰等信号后, 在此期间有效范围内共获取微震事件 712 个, 占研究数据范围内微震事件数的 50% 左右。从图中可以看出, 岩石微破裂主要集中在拱肩槽, 在 750 m 高程排水洞聚集以及 610~700 m 高程之间层内错动带 LS_{331} 、 LS_{337} 成条带状分布。由于软弱结构面强度较低, 性状较差, 能量大、震级高的岩石微破裂在 LS_{331} 上盘岩体聚集, 该区域是开挖阶段左岸边坡主要损伤区。

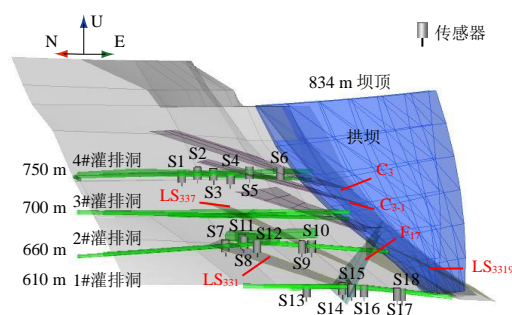


图10 3个高程传感器空间布置

Fig.10 Spatial arrangement diagram of sensors at three elevations

2014 年 12 月 26 日, 拱肩槽建基面开挖至 628 m 高程, 左岸边坡 F_{17} 和 LS_{3319} 出现控制裂缝, 建基面暂停开挖, 边坡施工强度降低。2015 年 2 月~2015 年 7 月, 进行坡内灌排廊道的开挖, 微震活动相对减弱, 共采集微震事件 746 个。受前期坝基边坡自上而下大体积开挖卸荷影响, 坡体应力重分布引起层内错动带 LS_{331} 、 LS_{337} 、断层 F_{17} 的活化, 诱发附近顺向坡岩体产生剪切错动变形破坏。图 12 为此阶段微震事件空间分布和密度云图, 可以看出, 自 2015 年 2 月以后, 微震事件逐渐沿缓倾错动带 LS_{331} 、 LS_{337} 向坡体中下部扩展, 并在断层 F_{17} 上盘延伸发育聚集, 在拱肩槽附近集中, 形成主要的损伤区域。

微震活动规律可以很好地揭示边坡工程施工扰动对地质构造损伤和软弱结构面活化的影响, 再次表明, 缓倾错动带及断层是控制白鹤滩顺层岩质边坡开挖卸荷变形的重要因素。由此说明, 微震监测能够实时监测施工对顺层岩质边坡的扰动及准确地圈定和识别岩石内部可能存在的微破裂风险区, 为下阶段坝基开挖稳定性评价提供一定参考依据。

5 基于数值模拟与微震监测的顺层岩质边坡稳定性综合评价

图 13(a)为监测以来 (2014 年 11 月~2015 年 7

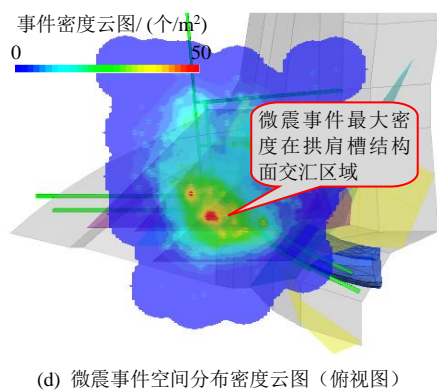
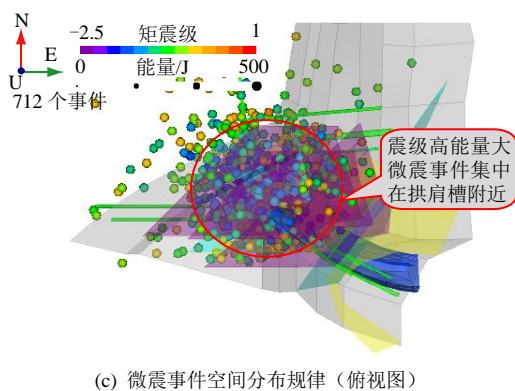
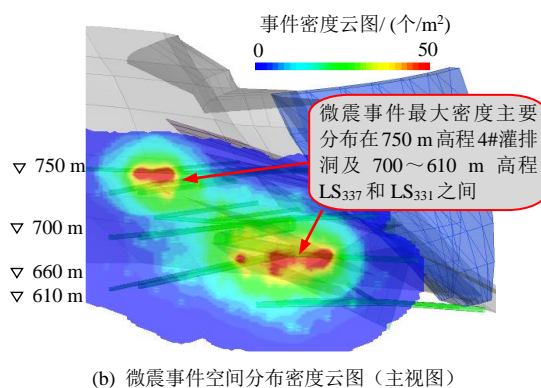
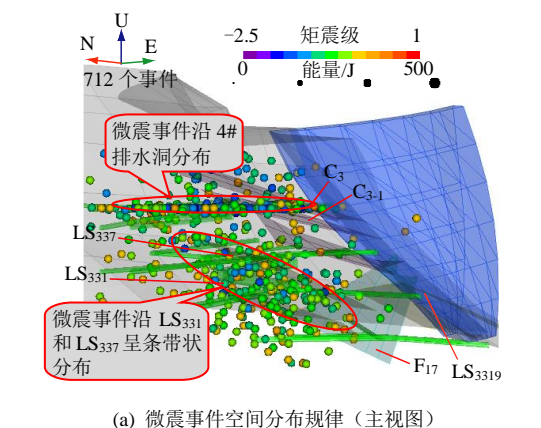


图 11 微震事件空间分布规律及密度云图
(2014-11~2015-1)

Fig.11 Spatial distribution of microseismic events and its density nephogram (2014-11~2015-1)

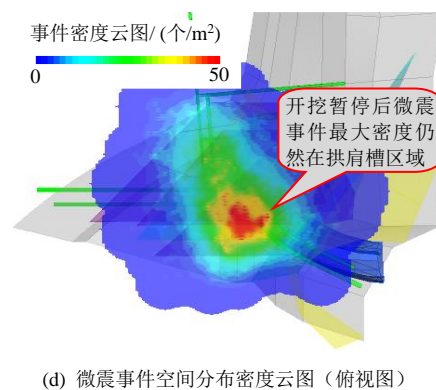
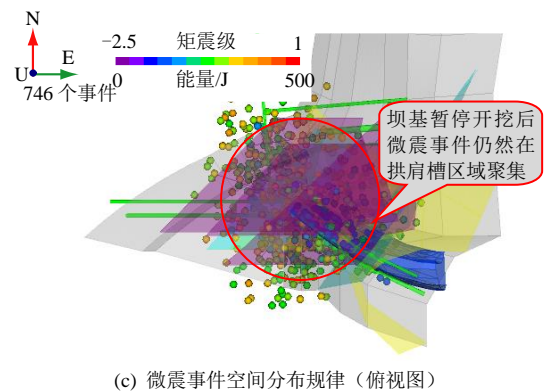
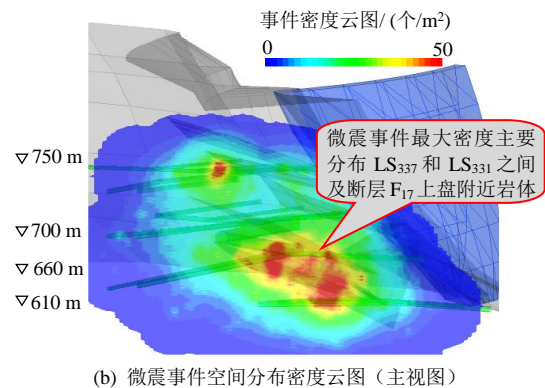
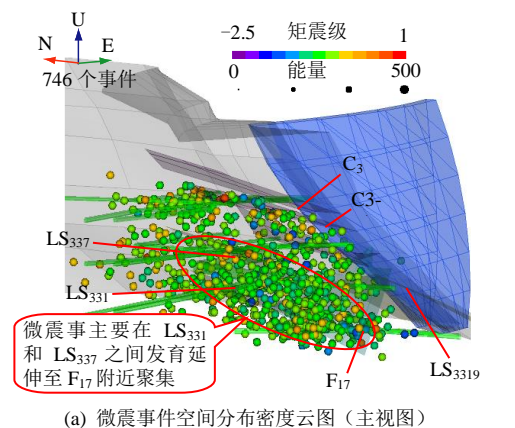


图 12 微震事件空间分布规律及密度云图
(2015-2~2015-7)

Fig.12 Spatial distribution of microseismic events and its density nephogram (2015-2~2015-7)

月)微震事件的空间分布规律,由图可以看到, F_{17} 附近的微震事件出现一定数量的聚集。地震变形云图 13(b)表明,坝基深部岩体沿 LS_{331} 、 LS_{337} 之间产生变形延伸至 F_{17} ,其中 F_{17} 附近为坝基边坡的主要变形损伤区。图 13(c)为当前开挖阶段(2015 年 7 月对应开挖面高程 628 m)的变形位移,在卸荷作用下 F_{17} 、 LS_{3319} 分别出现张拉和剪切变形,且在浅层区域变形相对较大。目前坝基抗力体 F_{17} 断层已经出现拉伸破坏现象(图 13(d)),表明边坡的下挖卸荷诱发断层 F_{17} 活动,造成坝基的宏观变形破坏,与数值模拟和微震监测结果有较好的对应关系。坝基开挖完成对应的位移矢量参见图 13(e),图中断层 F_{17} 与多条错动带在开挖影响下,形成多个不稳定的

切割块体, LS_{331} 上盘岩体沿错动带产生较明显的水平向变形,最大变形出现在坡脚岩坎处,方向偏向水平指向河谷。综合左岸边坡数值计算与微震监测结果分析及现场变形情况,到目前为止,坝基边坡没有出现较大的失稳破坏,初步说明变形基本趋于稳定,但随着建基面开挖高程的降低,在卸荷扰动下性状较差的软弱结构面活化,缓倾错动带 LS_{331} 、 LS_{3319} 、 LS_{3318} 、 LS_{337} 的剪切滑移变形、断层 F_{17} 拉伸变形是坡内深部岩体裂缝产生的主要原因,致使微破裂向低高程演化发展,在 F_{17} 附近聚集,揭示软弱结构面交汇处为左岸边坡潜在风险破坏区,在坝基开挖施工时需要密切关注该部位监测数据的收敛和异常情况。

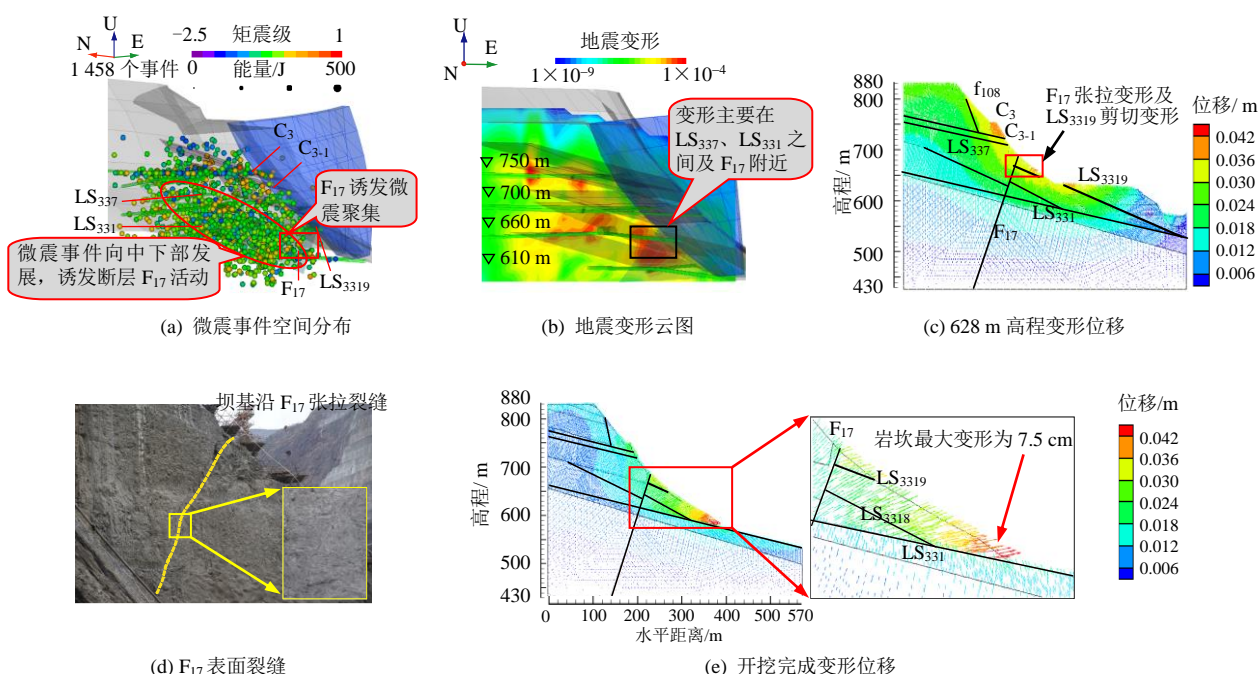


图 13 左岸边坡微震监测与数值模拟对比分析

Fig.13 Comparison of microseismic events and numerical simulation of the left bank slope

6 结 论

(1) 坡内发育的缓倾错动带和断层等软弱地质结构面在开挖过程中对顺层边坡的变形和稳定性起到控制性作用。数值计算揭示的影响因素可用于解释顺层岩质边坡开挖过程主要部位的变形机制。

(2) 边坡内部岩体微震活动性特征与施工动态密切相关,也受到复杂地质结构和地应力影响。微震活动规律能很好地揭示边坡工程施工与地质构造、软弱结构面活动间的相互关系,正确圈定和识别边坡可能的破坏区域。

(3) 目前左岸坡体变形基本趋于稳定,但 LS_{331}

上盘多个软弱结构面交错部位仍是开挖卸荷过程潜在破坏区域,建议采取有效的加固措施,以保证坝基的稳定性。

(4) 基于数值模拟和微震监测的分析方法可以多角度揭示左岸顺层岩质边坡的失稳破坏本质,为复杂应力条件下高陡岩质边坡开挖变形预测预警提供思路。研究成果对西南地区水电高陡岩质边坡工程的施工、支护设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 宋胜武, 冯学敏, 向柏宇, 等. 西南水电高陡岩石边坡工程关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,

- 30(1): 1—22.
- SONG Sheng-wu, FENG Xue-min, XIANG Bai-yu, et al. Research on key technologies for high and steep rock slopes of hydropower engineering in Southwest China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 1—22.
- [2] 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.
- [3] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [4] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(6): 835—840.
- [5] CHENG Y M, LANSIVAARA T, WEI W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods[J]. **Computers and Geotechniques**, 2007, 34(3): 137—150.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅, 邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1943—1952.
- ZHENG Yin-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Wei-dong. Numerical simulation on failure mechanism of rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 1943—1952.
- [7] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254—260.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Yin-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 254—260.
- [8] 平瞳其, 罗先启, 郑安兴. 地震作用下裂隙对岩质边坡稳定性影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 601—606.
- PING Tong-qi, LUO Xian-qi, ZHENG An-xing. Analysis of influence of cracks on rock slope stability under seismic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 601—606.
- [9] 徐奴文, 唐春安, 唐世斌, 等. 考虑弱层置换的岩石边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 495—500.
- XU Nu-wen, TANG Chun-an, TANG Shi-bin, et al. Stability analysis of rock slope considering weak-layers replacement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 495—500.
- [10] 徐奴文, 唐春安, 周钟, 等. 基于三维数值模拟和微震监测的水工岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1373—1381.
- XU Nu-wen, TANG Chun-an, ZHOU Zhong, et al. Stability analysis of hydraulic rock slope based on three-dimensional numerical simulation and microseismic monitoring[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(7): 1373—1381.
- [11] 李鹏, 苏生瑞, 王闫超, 等. 含软弱层岩质边坡的动力响应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 365—378.
- LI Peng, SU Sheng-rui, WANG Yan-chao, et al. Research on dynamic response of rock slope with weak layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 365—378.
- [12] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠. 应用离散元强度折减对复杂边坡进行稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 569—574.
- NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang. Application in complicated high slope with strength reduction method based on discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 569—574.
- [13] 雷远见, 王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1693—1698.
- LEI Yuan-jian, WANG Shui-lin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1693—1698.
- [14] 宋肖冰, 石安池, 郑伟峰, 等. 金沙江白鹤滩水电站坝区左岸边坡变形特征及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3533—3538.
- SONG Xiao-bing, SHI An-chi, ZHENG Wei-feng, et al. Analysis of slope deformation characteristics and mechanism in left bank of Baihetan hydropower station Jinsha River[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3533—3538.
- [15] LIU Y, LI H, XIAO K, et al. Seismic stability analysis of a layered rock slope[J]. **Computers and Geotechniques**, 2014, 55: 474—481.
- [16] 杜朋召, 刘建, 韩志强, 等. 基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 393—398.
- DU Peng-zhao, LIU Jian, HAN Zhi-qiang, et al. Stability analysis of high rock slope based on meticulous description of complex structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 393—398.
- [17] 沈华章, 郭明伟, 王水林, 等. 基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 592—600.
- SHEN Hua-zhang, GUO Ming-wei, WANG Shui-lin, et al. Vector sum method for slope stability analysis based on discrete elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 592—600.
- [18] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground

- caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China[J]. **Engineering Geology**, 2015, 188: 48—67.
- [19] 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 Jin-long, XU Wei-ya, JIN Hai-yuan, 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.
- [20] 朱继良, 黄润秋, 张诗媛, 等. 某大型水电站高位边坡开挖的变形响应研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 784—791.
- ZHU Ji-liang, HUANG Run-qiu, ZHANG Shi-yuan, et al. Deformation response of high-order slope excavation of a large hydroelectric station in China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(5): 784—791.
- [21] 王义峰. 基于测斜仪监测成果的蠕滑体变形机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 212—216.
- WANG Yi-feng. Analysis of creep deformation mechanism based on monitoring results of inclinometer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 212—216.
- [22] 李彪, 戴峰, 徐奴文, 等. 深埋地下厂房微震监测系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 3375—3383.
- LI Biao, DAI Feng, XU Nu-wen, et al. Microseismic monitoring system and its engineering applications of deep-buried underground powerhouse[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Suppl.1): 3375—3383.
- [23] XU N W, LI T B, DAI F, et al. Microseismic monitoring of strainburst activities in deep tunnels at the Jinping II hydropower station, China[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2015: 1—20.
- [24] MA T H, TANG C A, TANG L X, et al. Rockburst characteristics and microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 49: 345—368.
- [25] 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 in southwestern China[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(6): 950—963.
- [26] 张伟狄, 黄褶辉, 王建新, 等. 金沙江白鹤滩水电站左右岸 600 m 高程以上坝肩开挖及支护工程招标设计报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2013.
- ZHANG Wei-di, HUANG Zhe-hui, WANG Jian-xin, et al. Report on engineering bidding design of excavation and support of the left and right bank dam abutment above the elevation of 620 m of the Baihetan hydropower station along Jinsha River[R]. Hangzhou: Power China Huadong Engineering Corporation Limited, 2013.
- [27] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [28] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC User's Guide, version 4.0[CP]. Minneapolis: Hc Itasca, 2004.
- [29] 王贤彪, 靳锴, 姚伟, 等. 金沙江白鹤滩水电站施工详图阶段左岸坝基及坝肩边坡高程 720~628 m 变形处理工程地质报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2015.
- WANG Xian-biao, JIN Kai, YAO Wei, et al. Report on engineering geology of deformation treatment of the left bank dam foundation and dam abutment slope at the elevation of 720~628 m of the Baihetan hydropower station along Jinsha River[R]. Hangzhou: PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, 2015.
- [30] 金长宇, 冯夏庭, 张春生. 白鹤滩水电站初始地应力场研究分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 845—850.
- JIN Chang-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Chun-sheng. Research on initial stress field of Baihetan hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 845—850.

上接第 2357 页

- [8] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [9] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1980, 106(GT9): 1013—1035.
- [10] HOEK E, MARINOS P. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion[J]. **Soils and Rocks**, 2007, (2): 1—8.
- [11] 温勇, 杨光华, 汤连生, 等. 基于广义位势理论的土的数值弹塑性模型及其初步应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1324—1332.
- WEN Yong, YANG Guang-hua, TANG Lian-sheng, et al. A numerical elastoplastic model based on generalized potential theory and its preliminary application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(5): 1324—1332.
- [12] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46: 665—673.