

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0126

爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡 位移突变特征与能量机理*

杨建华¹, 代金豪¹, 姚池¹, 胡英国², 张小波¹, 周创兵¹

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031;

2. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对白鹤滩水电站左岸坝基河谷底部边坡岩体爆破开挖, 采用现场岩体位移监测、锚索轴力监测及数值模拟的手段, 研究了爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡的位移突变特征及其能量机理。研究表明: 对于深切河谷底部高地应力边坡岩体爆破开挖, 爆炸荷载挤压及地应力作用下, 岩体所积聚的应变能快速释放, 导致了节理岩质边坡的位移突变, 突变位移包括节理张开位移和岩体回弹位移两部分; 地应力水平越高、岩体弹性模量越低, 总的突变位移量越大; 预应力锚索主要通过抑制节理张开位移来控制边坡岩体的位移突变, 锚索预应力等级越高, 其吸能和释能速率越高, 对节理岩体位移突变的控制效果越好, 当锚索的预应力等级高到一定程度后, 节理岩体的突变位移不再随锚索预应力等级的升高而显著减小。

关键词: 边坡; 节理岩体; 预应力锚索; 爆破开挖; 位移突变

中图分类号: O382.2 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Displacement mutation characteristics and energy mechanisms of anchored jointed rock slopes under blasting excavation disturbance

YANG Jianhua¹, DAI Jinhao¹, YAO Chi¹, HU Yingguo², ZHANG Xiaobo¹, ZHOU Chuangbing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, Jiangxi, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: The stability of anchored jointed rock slopes under dynamic disturbance of blasting excavation is a major concern for designers and constructors. For the left-bank slope at the valley bottom of the Baihetan hydropower station, the displacement characteristics and related energy mechanism of the anchored jointed rock slope under blasting excavation disturbance were investigated. The field monitoring data of the rock mass displacement and the anchor cable axial force were first presented to show their synchronous mutation characteristics under blasting excavation disturbance. A three-dimensional numerical simulation was then conducted by using FLAC^{3D} to reveal the energy mechanism of the rock mass displacement mutation. The controlling effect of prestressed anchor cables on the rock mass displacement mutation was finally analyzed from the perspective of energy absorption and release. The results show that for the blasting excavation of the rock mass subjected to high in-situ stress at the valley bottom, the displacement mutation of the jointed rock slope is attributed to the rapid release of accumulated strain energy. The accumulated strain energy originates two actions, one is the blasting pressure, and the other one is the in-situ stress. The abrupt displacement of the jointed rock slope includes joint opening displacement and rock springback displacement. The total abrupt displacement will increase as the result of the in-situ stress level increases and

* 收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(U1765207, 51969015, 52179102); 江西省自然科学基金(20192ACB21019, 20204BCJ23002); 江西省重点实验室计划项目(20181BCD40003)

第一作者: 杨建华(1986—), 男, 博士, 副教授, yangjianhua86@ncu.edu.cn

通信作者: 姚池(1986—), 男, 博士, 教授, chi.yao@ncu.edu.cn

the elastic modulus of the rock mass decreases. The prestressed anchor cable has a restraining effect on the displacement mutation of the jointed rock slope, and it mainly controls the joint opening displacement. The anchor cable with a higher prestress level corresponds to higher energy absorption and release rates, and thus has a stronger restraint on the displacement mutation of the jointed rock slope. However, when the prestress of the anchor cable is increased to a higher level, the displacement mutation of the jointed rock slope no longer decreases significantly with an increase in the prestress level.

Keywords: slope; jointed rock mass; prestressed anchor cable; blasting excavation; displacement mutation

中国西南地区大型水电工程高边坡工程规模巨大、地质环境复杂、工程作用强烈,高边坡的变形与稳定控制是高坝工程建设与运行安全的重要保障^[1]。钻孔爆破是水电工程岩石高边坡开挖的主要手段,节理岩质边坡在爆破开挖过程中常发生位移突变,影响边坡的稳定^[2-4]。预应力锚索作为一种主动支护技术,因其施工方便、见效快和造价低等优点在边坡支护中得到了广泛的应用^[5-6],有效地控制了边坡岩体的位移突变。

对于节理岩质边坡的位移突变问题,国内外学者从卸荷松动和爆炸荷载扰动的角度进行了广泛的研究。Yoshida 等^[7]、Sheng 等^[8]通过数值模拟与现场实测数据的对比分析,认为开挖引起边坡岩体内应力释放及重分布是造成边坡表面岩体位移增加、节理张开及滑移的主要原因。卢文波等^[9]的研究表明,爆破开挖过程中岩体初始地应力的释放具有瞬态特性,地应力的瞬态释放会导致岩体节理张开;罗忆等^[10]采用室内试验验证了地应力瞬态卸载条件下的节理岩体位移突变问题,并认为突变位移与初始地应力的平方成正比。Gran 等^[11]通过对节理岩体模型进行爆破试验,发现爆炸应力波传播至节理处发生反射会将节理拉开;金李等^[12]利用一维应力波理论对节理岩体的爆破松动机理进行了分析;代金豪等^[3]则从能量的角度研究了节理岩体的爆破松动问题,认为爆炸荷载作用期间岩体积累的应变能及其释放速率决定了岩体的爆破松动位移。以往的研究多将地应力瞬态卸荷和爆炸荷载扰动效应分开讨论,较少涉及二者耦合作用下节理岩质边坡的位移突变特征。

在工程现场,边坡爆破开挖施工与锚固支护常穿插进行。众多学者在预应力锚索对节理岩质边坡变形控制的机理方面开展了研究,如丁秀丽等^[5]提出预应力锚索锚固效应使得岩体力学性能劣化在边坡开挖过程中得到缓解,进而抑制了边坡变形;Yang 等^[13]通过数值模拟研究发现,锚索预应力的施加可有效改善岩体的应力状态并提高软弱面的抗滑力,从而达到控制边坡变形的目的;李剑等^[6]则认为对于高陡岩质边坡,预应力锚索主要在于限制潜在可动滑体在开挖过程中的位移发展。上述有关预应力锚索控制边坡变形的机理研究多针对静态或拟静态力学条件进行。对于深切河谷底部地应力集中区的边坡岩体爆破开挖,存在爆炸荷载与地应力瞬态卸荷 2 种动力扰动。有关爆炸荷载与地应力瞬态卸荷耦合作用下的锚固节理岩质边坡位移突变机理,目前研究还较为少见。

本文中,首先,对白鹤滩水电站左岸坝基节理岩质边坡爆破开挖过程中的岩体位移及锚索轴力进行现场监测资料分析;然后,建立三维节理岩质边坡数值模型,分析爆炸荷载与地应力瞬态卸荷耦合作用下节理岩质边坡的位移突变特性及其能量机理,并从能量的角度研究预应力锚索对节理岩质边坡位移突变的控制机理。

1 节理岩质边坡位移突变与预应力锚索轴力监测分析

1.1 工程概况

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,左岸坝基边坡岩体由峨眉山玄武岩构成,其中 834~820 m 高程的岩体主要为弱风化下段、弱卸荷的 III₂ 类岩体,820~600 m 高程的岩体主要为弱风化下段~微新无卸荷的 III₁ 类岩体,600 m 高程以下的岩体主要是微新无卸荷的 II 类岩体,如图 1 所示。680 m 高程出露的 NE 向断层 F₁₇ 斜切坝基边坡,在 F₁₇ 上盘岩体中发育有 NNW 向张扭性断层 f₁₀₈ 和 f₁₁₀、层间错动带 C₃ 和 C₃₋₁ 以及层内错动带 LS₃₄₂、LS₄₁₁ 和 LS₄₂₃ 等。在 F₁₇ 下盘岩体中存在有顺坡向的层内错动带 LS₃₃₁₉、LS₃₃₁ 和 LS₃₃₀₁ 等,还发育有纵横交错且易松弛的柱状节理和微裂隙。

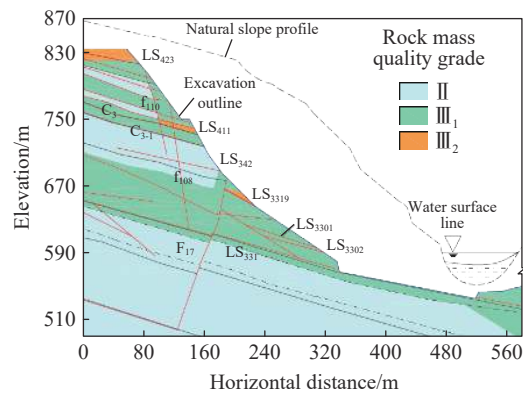


图 1 白鹤滩水电站左岸坝基边坡地质剖面图

Fig. 1 Geological section of the left-bank dam foundation slope at the Baihetan hydropower station

1.2 监测点布置

随着左岸坝基边坡爆破开挖施工向河谷底部推进, LS_{3301} 、 LS_{3302} 、 LS_{331} 等顺坡向层内错动带和柱状节理岩体在 620~580 m 高程逐渐出露, 这些软弱结构面交错切割岩体形成的潜在可滑动块体与临空面构成了不利组合, 严重威胁边坡的稳定性。为此, 现场垂直于建基面布置长短不等的预应力锚索对坝基边坡潜在不稳定块体进行加固, 锚索预应力等级为 3 000 kN。

为掌握开挖施工过程中坝基边坡的位移变化情况及预应力锚索的工作性态, 现场开展了边坡变形与预应力锚索轴力的联合监测, 如图 2 所示。在 615 m 高程处布置了一个表面位移计, 编号为 D1; 考虑到层内错动带 LS_{3301} 在开挖过程中可能会产生过大的滑动而引起边坡失稳, 在 1 号帷幕洞与 1 号排水洞的侧壁上分别布置了一套裂缝计监测裂缝的开合度和错动位移, 编号分别为 F1 和 F2; 在 607 和 600 m 高程处 3 000 kN 级的预应力锚索上分别安装了一套锚索测力计, 编号分别为 C1 和 C2。

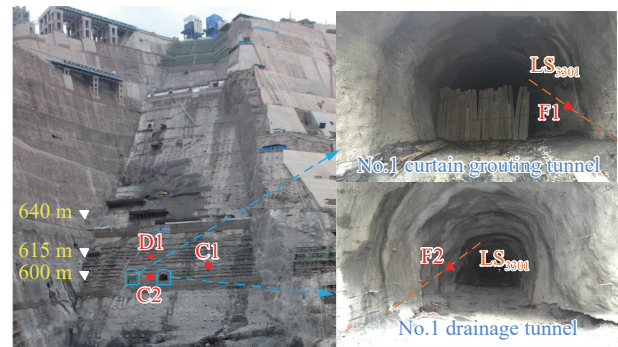


图 2 边坡位移与预应力锚索轴力监测点布置

Fig. 2 Arrangement of the observation points for monitoring the slope displacement and anchor cable axial force

1.3 边坡位移及锚索轴力监测数据分析

2016 年 6 月 1 日至 2016 年 8 月 23 日, 白鹤滩水电站左岸坝基边坡从 605 m 高程开挖至 580 m 高程, 607 和 600 m 高程处 3 000 kN 级预应力锚索分别在 2016 年 6 月 1 日和 7 月 3 日前安装完成。该段时间内边坡表面观测点 D1 处的水平位移、内部裂缝监测点 F1 处的错动位移和 F2 处的张开位移随时间变化如图 3 所示。从图 3 可以看到, 爆破开挖施工期间, 各监测点的位移增长较快, 特别是在 595~590 m 高程和 590~585 m 高程梯段爆破时, 由于爆区距 F1 和 F2 监测点较近, F1 监测点的错动位移和 F2 监测点的张开位移均有在爆破后大幅突然增加的现象, 即位移突变。与此同时, 边坡表面监测点 D1 也发生了多次较明显的位移突变。尽管位移监测点所在高程的预应力锚索已经安装完成, 但位移突变现象仍有发生。2016 年 8 月 23 日梯段爆破施工停止后, 各监测点的位移增长较为缓慢, 且逐渐趋于稳定。截至 2016 年 10 月 29 日, 边坡表面测点 D1 处的水平位移为 29.9 mm, 内部监测点 F1 处的错动位移为 7.0 mm, F2 处的张开位移为 6.8 mm。

锚索监测点 C1 和 C2 处的轴力变化如图 4 所示, 在 595~590 m 高程梯段爆破开挖期间, 607 m 高程处 C1 监测点因距爆区较近且爆破规模较大, 该监测点的锚索轴力出现了明显的突增现象, 增量为 54.6 kN, 在随后的 2 个台阶爆破开挖过程中, C1 监测点的锚索轴力也发生了不同程度的突增。位于 600 m 高程

的 C2 监测点在 590~580 m 高程岩体爆破开挖过程中发生了较大幅度的锚索轴力突增, 最大增量为 53 kN。待开挖至 580 m 高程, 爆破施工停止后, 预应力锚索轴力增大变缓, 轴力逐渐趋于稳定。C1 和 C2 监测点锚索的轴力最终分别稳定在 3 383.9 和 3 321.2 kN, 较初始值分别增大 16.2% 和 8.9%。

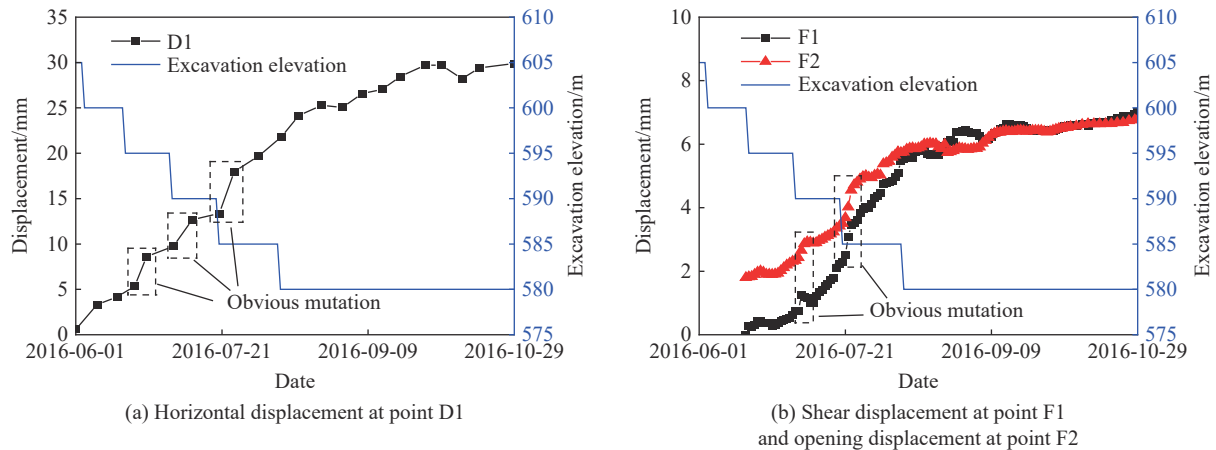


图 3 各监测点位移随时间变化曲线

Fig. 3 Slope displacement histories at the different observation points

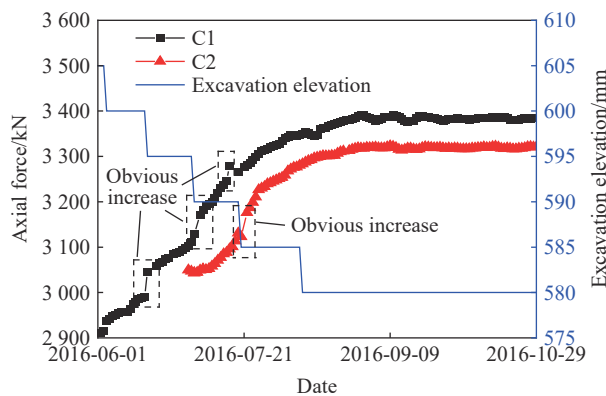


图 4 各监测点预应力锚索轴力随时间变化曲线

Fig. 4 Axial force histories of the prestressed anchor cables at the different observation points

综上, 节理岩质边坡位移的变化与锚索轴力的变化具有一致性, 二者在附近有大规模岩体爆破时均出现了不同程度的突变, 预应力锚索通过自身轴力的增大抑制边坡出现过大的位移突变。毫无疑问, 岩体中结构面交错分布形成的具有后缘拉裂面、底滑面和侧滑面的潜在滑动块体是边坡发生位移突变的内在条件, 而爆破开挖扰动是诱发节理岩质边坡位移突变的外在条件。众所周知, 深切河谷具有应力降低、升高和原始三带的“驼峰形”及谷底存在“高应力包”的地应力分布基本规律, “高应力包”深度可达谷底以下 150~200 m^[14]。刘国锋等^[15]的研究表明, 白鹤滩水电站河床谷底应力在 20 MPa 以

上。对河床谷底高地应力岩体的爆破开挖, 伴随着炸药爆轰、岩体破碎及新开挖面的形成, 开挖边界上的岩体地应力在岩体破碎瞬间也随之突然释放; 该过程为一瞬态卸荷力学过程, 在边坡保留岩体中激发瞬态卸载应力波, 引起近邻开挖面的岩体应力动态调整^[16-18]。因此, 对于谷底高地应力岩体爆破开挖, 诱发节理岩质边坡位移突变的动力扰动除爆炸荷载外, 还包括地应力瞬态卸荷过程, 二者几乎同步发生。然而, 由于监测设备的局限性, 上述实测数据仅能反映每日的边坡位移及锚索轴力变化值, 无法反映爆破开挖动力扰动下边坡位移与锚索轴力的瞬态调整过程。下文将采用数值模拟方法, 研究爆炸荷载与地应力瞬态卸荷联合作用下边坡位移与锚索轴力的动态变化过程及相关能量机理。

2 数值模拟

2.1 数值模型与材料参数

采用有限差分软件 FLAC^{3D}, 研究爆破开挖动力扰动下锚固节理岩质边坡的位移突变特性及能量机制。白鹤滩左岸坝基边坡地质条件复杂, 岩体结构面众多, 影响边坡位移突变的因素多而复杂, 若将众

多因素均考虑在内, 很难揭示爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡位移突变的力学本质。为此, 采用概化的节理岩质边坡模型进行数值模拟研究, 以揭示爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡位移突变的能量机理。为便于进行机理分析, 考虑爆炸应力波和瞬态卸载应力波垂直入射节理面的情况, 建立含垂直和水平节理的概化边坡模型, 如图 5 所示。模型整体尺寸为 $40\text{ m} \times 6\text{ m} \times 30\text{ m}$, 包括 3 个高 5 m 的直立台阶, 上 2 层台阶已开挖完成, 第 3 层台阶正在进行爆破开挖施工。第 2 层和第 3 层台阶岩体中存在一个由一组后缘垂直节理面、一组底部水平节理面和两组侧部垂直节理面切割而成的潜在滑动体, 其尺寸为 $8\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。在第 2 层台阶上施加 2 根垂直于边坡坡面的预应力锚索, 锚索总长设置为 20 m, 自由段与锚固段的长度分别为 12 和 8 m, 2 根锚索到第 3 层台阶顶部的距离分别为 2 和 4 m。卢文波等^[9]、罗忆等^[10] 和金李等^[12] 也采用类似的概化模型进行了相关的研究, 并取得了有益的结论; 此外, 卢文波等^[9] 的研究还表明, 如底滑面为顺层的倾斜滑面时, 节理岩体的位移突变特征与底滑面为水平时的情况类似, 只是最终的位移值会更大一些。篇幅所限, 本文中仅考虑底滑面为水平节理面的情况。

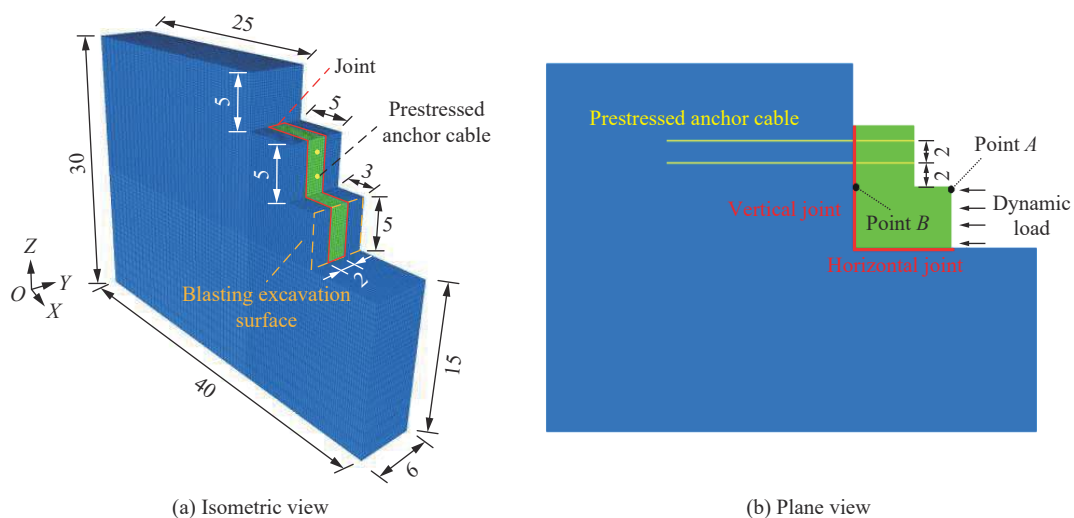


图 5 锚固节理岩质边坡数值模型(单位: m)

Fig. 5 The anchored jointed rock slope model (unit: m)

白鹤滩左岸坝肩及坝基边坡主要出露玄武岩中部 $P_2\beta_3$ 及 $P_2\beta_4$ 层, 总厚度约 350 m, 岩性主要有斜斑玄武岩、隐晶质玄武岩、柱状节理玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩、凝灰岩 6 种。高程 660~555 m 坝基部位出露 $P_2\beta_3$ 层第 1 类柱状节理玄武岩, 该层厚度约为 55 m。本文中研究 610~580 m 高程坝基边坡岩体开挖, 该高程范围内坝基边坡岩体只含有第 1 类柱状节理玄武岩这一种岩层, 根据现场地质勘察和室内试验结果^[9], 第 1 类柱状节理玄武岩岩石及节理物理力学参数如表 1 所示。数值模拟中将岩石假定为线弹性材料; 对于岩体中的节理面, 采用 FLAC^{3D} 提供的基于库伦剪切本构模型的无厚度 interface 单元进行模拟, interface 单元可以模拟荷载作用下 2 个接触面之间的错动滑移、张开、闭合等变形^[20], 模拟中不考虑节理面的抗拉强度和黏聚力; 预应力锚索则采用 cable 单元进行模拟^[20], 锚索的物理力学参数如表 2 所示。根据 Blair 的研究^[21], 为满足动力分析精度, 数值模型的网格尺寸不应超过应力波波长的 $1/12 \sim 1/6$, 本模型的最小波长 (Rayleigh 波的波长) 约为 2.2 m, 因此动力加载边界附近的单元尺寸划分为 0.25 m, 模型总共划分为 1 793 136 个单元。

表 1 岩石与节理的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock and joints

岩石			节理		
弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/(°)	法向刚度/GPa	剪切刚度/GPa
40	0.25	2700	25	20	10

表 2 锚索的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the anchor cable

锚索索体			锚固剂				
弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)	横截面积/mm ²	黏聚力/(N·m ⁻¹)	内摩擦角/(°)	剪切刚度/GPa	锚固外圈周长/mm	锚固剂厚度/mm
200	7 890	3 465.8	2×10 ⁷	38	10	518.1	49.2

2.2 动力荷载

由于预裂孔距边坡开挖轮廓最近,且预裂孔爆破后形成的预裂缝阻碍了主爆孔爆破产生的应力波向边坡岩体内传播,预裂孔爆破对边坡保留岩体的动力扰动往往是最强烈的^[16]。因此,本文中仅研究预裂孔爆破动力扰动作用下锚固节理岩质边坡的位移突变。预裂爆破时每段 4 个炮孔同时起爆,由于炮孔直径远小于数值模型的尺寸,若将所有的炮孔均建立在模型中,为保证计算精度,数值模型的单元数将达到上千万,从而导致计算效率低甚至无法计算。为提高计算效率,本文将炮孔壁受到的爆炸荷载压力等效施加在图 5(a)所示的爆破开挖面上。根据圣维南原理,这种等效处理方法在计算炮孔附近的岩体动力响应时会产生一定的偏差,而在计算炮孔中远区的岩体动力响应时则与爆炸荷载压力施加在炮孔壁上的计算结果基本一致,该方法对于模拟中远区岩体动力响应问题的有效性已被证实^[12,16,22-23]。本文中研究的竖直节理面距炮孔较远,属于中远区问题,采用该等效方法是可行的。对于预裂孔爆破,炮孔中心连线与炮孔轴线所组成的平面即为爆破开挖面。根据圣维南原理,爆破开挖面上的等效爆炸荷载压力 $p_e(t)$ 与炮孔壁上的爆炸荷载压力 $p_w(t)$ 满足如下关系:

$$p_e(t) = (d_b/a) p_w(t) \tag{1}$$

式中: d_b 为炮孔直径, a 为炮孔间距。

根据凝聚炸药爆轰波的 CJ 理论,炸药爆炸后作用在炮孔壁上的爆炸荷载峰值压力 p_{w0} 为:

$$p_{w0} = \frac{\rho_e v_d^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\nu} \tag{2}$$

式中: ρ_e 为炸药密度; v_d 为炸药爆轰速度; γ 为炸药的等熵指数,一般取 3; ν 为爆生气体的绝热膨胀常数,近似取 1.5; d_c 为装药直径。

根据白鹤滩水电站左岸坝基边坡现场爆破采用的钻孔及炸药设计,取 $\rho_e=1\ 300\ \text{kg/m}^3$, $v_d=4\ 500\ \text{m/s}$, $d_b=76\ \text{mm}$, $d_c=25\ \text{mm}$, $a=0.6\ \text{m}$, 炮孔装药长度 $l_c=4.5\ \text{m}$ 。由式 (1) 和 (2) 计算可得爆破开挖面上的等效爆炸荷载峰值压力 $p_{e0}=15\ \text{MPa}$ 。目前获取爆炸荷载压力时程曲线的方法主要有 3 种: (1) 半经验半理论的计算公式; (2) 通过简化模型分析爆生气体的运动过程; (3) 采用数值模拟软件(如 LS-DYNA)模拟炸药爆轰过程。由于炸药爆炸产生的高温高压环境,现有的测试手段还很难从现场准确获取炮孔壁上或爆破开挖面上的爆炸荷载压力时程曲线。在实际工程爆破的数值模拟中,目前大多采用半经验半理论的爆炸荷载压力时程曲线,其中以双指数函数和进一步简化的三角形函数压力时程曲线应用最为广泛。本文中采用三角形荷载曲线,如图 6 所示,取爆炸荷载压力上升时间 $t_{ri}=1\ \text{ms}$ 、持续时间 $t_d=9\ \text{ms}$,其计算过程详见文献 [16] 和 [23],爆炸荷载压力时程曲线 $p_e(t)$ 的表达式为:

$$p_e(t) = \begin{cases} p_{e0} \frac{t}{t_{ri}} & 0 \leq t < t_{ri} \\ p_{e0} \frac{t_d - t}{t_d - t_{ri}} & t_{ri} \leq t \leq t_d \\ 0 & t > t_d \end{cases} \tag{3}$$

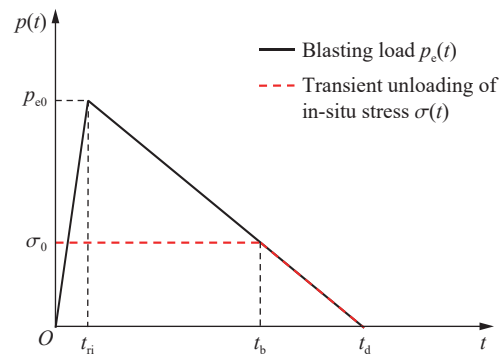


图 6 爆破开挖面上等效爆炸荷载与地应力瞬态卸荷历程曲线

Fig. 6 Time-histories of the equivalent blasting pressure and the transient unloading of in-situ stress on the blasting excavation boundary

同一排炮孔同时起爆时, 爆生裂纹优先在炮孔连线方向上扩展, 当裂纹完全贯通、开挖面上的爆炸荷载压力衰减至与开挖面上的地应力大小相等时, 开挖面岩体才出现宏观上的卸荷效应^[9]。根据应力连续条件, 爆破开挖面上的地应力瞬态卸荷历程在岩体出现宏观卸荷后与爆炸荷载作用曲线重合, 如图 6 所示, 地应力瞬态卸荷时程曲线 $\sigma(t)$ 可表示为:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_0 & 0 \leq t < t_b \\ \sigma_0 \frac{t_d - t}{t_d - t_b} & t_b \leq t \leq t_d \\ 0 & t > t_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_0 为爆破开挖面上的地应力; t_b 为卸荷开始时间。

第 3 层最后一个梯段预裂爆破时, 取爆破开挖面上的地应力 $\sigma_0=5$ MPa, 根据图 6, 地应力瞬态卸荷持续时间 $t_u=t_d-t_b=2.7$ ms。需要说明的是, 虽然白鹤滩水电站河床谷底的初始地应力较高 (20 MPa 以上)^[15], 但随着开挖工作面逐步向坝基边坡轮廓面推进, 边坡轮廓面上的初始地应力也逐步释放, 因此在最后一个梯段爆破时, 坝基边坡轮廓面上的地应力取一个较小的值。

数值模拟过程中, 首先进行地应力和预应力锚索作用下的静力求解, 模型四周设置为法向位移约束, 待计算达到平衡后打开动力求解模块, 将上述爆炸荷载和地应力瞬态卸荷作用历程用 FISH 语言编写后施加在爆破开挖面上进行动力求解。为防止动力荷载激发的应力波传播至模型四周边界发生反射而影响计算结果, 动力计算中将模型四周设置为可吸收入射波的黏性边界。岩体阻尼采用 FLAC^{3D} 提供的局部阻尼, 局部阻尼系数设置为 0.157。

3 节理岩质边坡位移突变特征与能量机理

为对比分析预应力锚索对节理岩质边坡位移突变的影响, 本文数值模拟分 2 类工况进行研究, 一类未施加预应力锚索, 另一类为施加预应力锚索工况。由于岩体出现朝向河谷的位移时对边坡稳定最为不利, 因此本文在潜在滑动块体的前缘和后缘各选取一个监测点 A 和 B (见图 5) 分析边坡的水平位移及应变能密度特性。

3.1 未施加预应力锚索工况

未施加预应力锚索时, 爆破开挖动力扰动下两监测点的水平位移和应变能密度时程曲线如图 7 所示。在初始地应力 σ_0 的作用下, 节理岩体本身储存有一定量的应变能; 爆炸荷载作用后, 节理岩体被压缩, 岩体中进一步积聚应变能。随着爆炸荷载压力降低以及地应力释放, 岩体开始回弹, 岩体中的应变能得以释放。在 $t=9$ ms 左右时, 爆炸荷载压力降为零, 被压缩的岩体回弹恢复到爆炸荷载作用前的状态, 此时监测点的位移为零。但由于爆炸荷载压力快速降低和地应力瞬态释放所产生的惯性力作用, 潜在滑动块体继续向河谷方向运动, 导致后缘节理张开, 产生了节理张开位移。由于底部及两侧滑面的摩擦作用, 在 $t=30$ ms 左右时, 岩块停止了运动, A 和 B 两监测点的最终位移分别为 6.5 和 5.6 mm, 该位移即为爆破开挖动力扰动过程中节理岩质边坡的突变位移。爆破开挖完成后, A 和 B 两监测点的最终水平位移之差为 0.9 mm; 而爆破前, 在初始地应力 σ_0 的作用下, A、B 两点的水平位移也正好相差 0.9 mm (即该岩块的压缩变形量为 0.9 mm), 这表明 A 和 B 两点最终位移之差是由于地应力释放、岩体松弛所产生的回弹位移。对于河谷底部高地应力边坡岩体爆破开挖, 边坡表面岩体的突变位移包括节理张开位移和回弹位移两部分。对于本算例中边坡表面的 A 监测点, 总突变位移为 6.5 mm, 节理张开位移为 5.6 mm, 回弹位移为 0.9 mm, 节理张开位移占到了总突变位移的 86.2%, 是节理岩质边坡位移突变的主要组成部分。

从能量的观点来看, 岩体由于地应力作用本身所存储的应变能以及爆炸荷载挤压作用所集聚的应变能为节理边坡岩体位移突变提供了能量来源, 上述 2 种应变能的快速释放是节理岩体位移突的直接诱因。代金豪等^[3]的相关研究表明, 岩体存储和集聚的应变能越高、应变能释放持续时间越短, 产生的位移突变就越大, 即位移突变与应变能释放率正相关。应变能释放率 r_{SER} 为:

$$r_{\text{SER}} = \frac{E_{\text{SER, max}}}{t_{\text{SER}}} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{SER, max}}$ 为岩体积聚的体积应变能峰值, t_{SER} 为应变能释放持续时间。

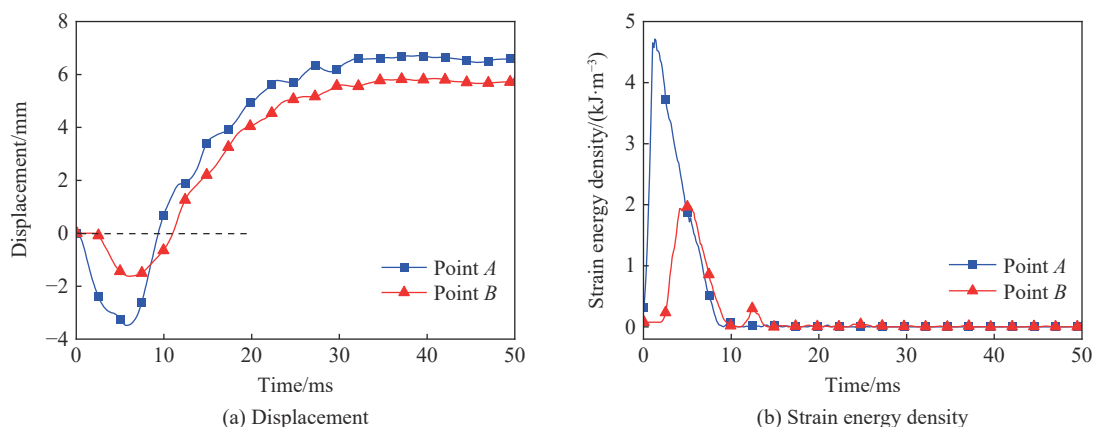


图 7 无预应力锚索时各监测点的岩体位移和应变能密度时程曲线

Fig. 7 Rock mass displacement and strain energy density histories at the observation points without prestressed anchor cables

因此,在保证开挖岩体正常破碎的前提下,通过优化爆破方案,降低岩体应变能的释放率有助于减小节理岩质边坡的位移突变。如采用低密度、低爆轰波速的炸药降低爆炸荷载峰值压力,从而降低岩体集聚的应变能;采用小抵抗线降低开挖面上的地应力,从而降低岩体存储的应变能;加强炮孔堵塞减缓爆生气体从孔口逸出,从而延长爆炸荷载压力衰减时间,即延长应变能释放持续时间。

3.2 施加预应力等级锚索工况

除爆破方案优化外,工程中还主要采用锚杆、锚索等支护方式来控制节理岩质边坡的位移突变。为探讨预应力锚索对节理岩质边坡位移突变的控制机理,设置锚索预应力等级分别为 1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 kN。图 8 给出了不同等级预应力锚索作用下边坡表面 A 点的位移和应变能密度变化时程曲线。可以看到,不同等级预应力锚索作用下,节理岩体的位移总体特征基本相同,均具有压缩→回弹→突变→稳定这 4 个阶段。不同预应力等级下节理岩体的压缩与回弹路径完全重合,这表明预应力锚索并不影响节理张开前岩体的位移与能量转化,不同等级预应力锚索作用下 A 点的应变能密度时程曲线完全重合也证明了这一点。在 $t=9$ ms 节理张开发生位移突变后,锚索预应力等级越高,节理岩体的突变位移越小。当预应力超过 1 000 kN 时,节理岩体在达到最大突变位移后会出现明显的“被拉回”现象,最终使突变位移稳定在较小的值。当预应力等级超过 1 500 kN 时,随着锚索预应力等级的提高,节理岩体的最终突变位移虽有所减小,但减小幅度不大。图 9 给出了不同等级预应力锚索作用下 A 监测点的节理最终张开位移和岩体最终回弹位移,随着预应力等级的提高,节理张开位移同样呈现先显著后缓慢降低的趋势,而岩体回弹位移基本保持不变,这表明预应力锚索主要是通过抑制节理张开来降低边坡岩体的位移突变。结合前述实测资料分析结果,预应力锚索的施加虽不能完全避免节理岩质边坡在爆破开挖过程中产生位移突变,但采用适当预应力等级的锚索进行加固后可有效减少岩体内节理的张开位移,从而防止边坡岩体位移突变过大。

针对预应力锚索在控制节理岩质边坡位移突变所发挥的作用,从能量的角度对其作用机理开展讨论。对于预应力锚索,其总的应变能 W 由锚索索体的拉压弹性应变能 W_{ca} 和锚固剂的剪切弹性应变能 W_{g} 组成^[20],分别由下式计算:

$$W = W_{\text{ca}} + W_{\text{g}} \quad (6)$$

$$W_{\text{ca}} = \sum_{i=1}^M \frac{F_i^2 L_i}{2E_{\text{ca}} S} \quad (7)$$

$$W_g = \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j^2 V_j}{2G} \quad (8)$$

式中: F_i 为第 i 个索体单元的轴力; L_i 为第 i 个索体单元的长度; E_{ca} 为锚索索体的弹性模量; S 为锚索索体横截面面积; τ_j 为第 j 个锚固剂单元的剪切应力; V_j 第 j 个锚固剂单元的体积; G 为锚固剂剪切模量; M 和 N 分别为索体单元和锚固剂单元的数量。

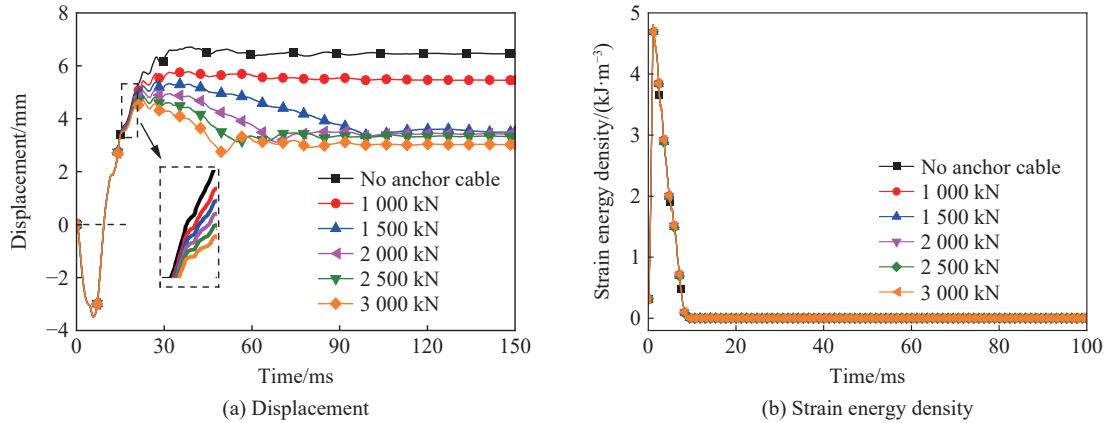


图 8 不同等级预应力锚索作用下监测点 A 的位移和应变能密度的时程曲线

Fig. 8 Rock mass displacement and strain energy density histories at the monitoring point A under different levels of the prestressed anchor cables

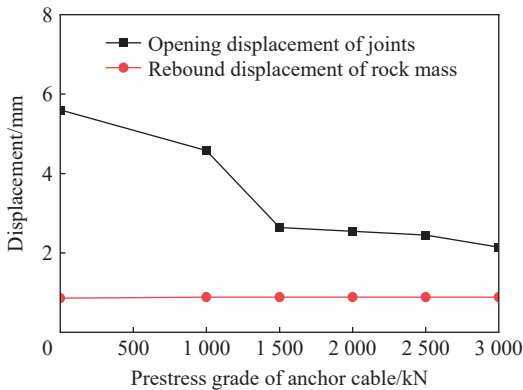


图 9 不同预应力等级下的节理最终张开位移与岩体最终回弹位移

Fig. 9 Joint opening displacement and rebound displacement under different levels of the prestressed anchor cables

通过 FLAC^{3D} 中的 FISH 语言对锚索总应变能 W 涉及的变量进行实时监测和计算, 得到不同等级预应力锚索总应变能的时程变化曲线, 如图 10 所示 (篇幅所限, 仅以 1 000 和 3 000 kN 等级为例)。锚索总应变能在开始突增前经历了降低和升高至初始值这 2 个阶段, 这与节理岩体在位移突变前发生压缩和回弹相对应; 在锚索应变能突增开始后存在吸能和释能 2 个阶段, 定义锚索的平均吸能速率或释能速率 K 为:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{\Delta W_k}{\Delta t_k} \right| \quad (9)$$

式中: Δt_k 为第 k 个时间段 ($k=1, 2, 3, \dots, n$); ΔW_k 为第 k 个时间段开始与结束时锚索的总应变能之差。锚索平均吸能和释能速率分别表示为 K_a 和 K_{re} 。

结合图 8(a) 和图 10 可以看到, 节理岩体发生位移突变后, 节理岩体与锚索相互作用, 节理岩体的动能转化为锚索的应变能, 锚索应变能急剧增加, 表现为吸能, 此时锚索被拉伸且轴力增大, 这与实测资料反映的规律相对应, 即节理岩体位移突变与锚索轴力突增具有同步性; 锚索的预应力等级越高, 吸能速率越高, 节理岩体以更高的速率达到较小的突变位移峰值; 在节理岩体的位移达到最大值后, 锚索的应变能开始释放, 释放的应变能作用于节理岩体, 部分转化为节理岩体的动能, 将滑动的岩块逐渐“拉回”, 随着底部及两侧滑面的摩擦耗能, 岩块最终停止运动, 位移趋于稳定; 锚索的预应力等级越高, 释能速率也越高, 节理岩体“被拉回”的效应也就越明显, 即节理岩体以更高的速率稳定至较小的最终位移值。综上, 预应力锚索通过自身具有的吸能与释能特性来控制边坡节理岩体的位移突变。

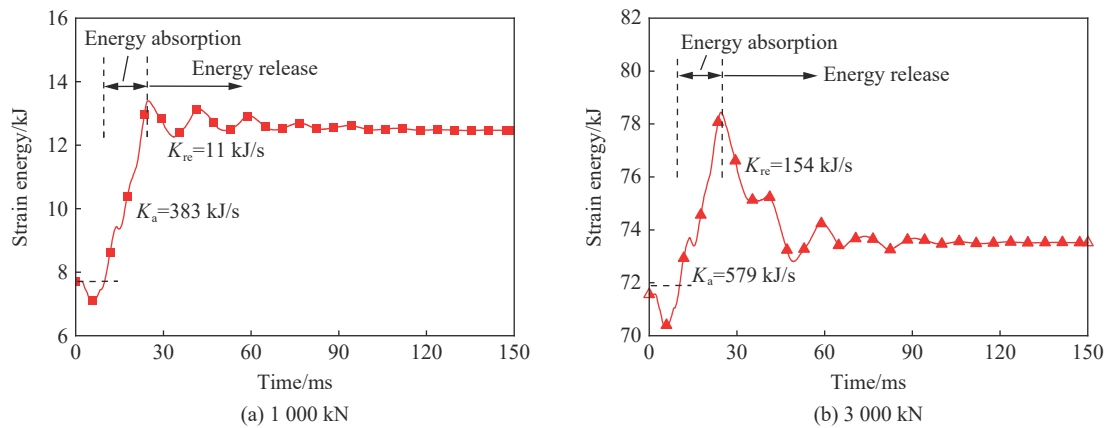


图 10 不同等级预应力锚索的总应变能时程变化曲线

Fig. 10 Time-histories of the total strain energy of the anchor cables under different prestress levels

受构造应力、边坡结构、开挖方案等多方面影响, 爆破开挖面上的初始地应力大小多有不同, 此外, 不同工程的岩体变形参数也各不相同。不同地应力水平和岩体弹性模量条件下监测点 A 的最终突变位移如图 11 所示。从图 11(a) 可以看到, 随着地应力水平的提高, 节理岩质边坡的突变位移增大, 这是由于较高的地应力会使岩体内储存更多的应变能, 相同释放时间情况下具有更高的应变能释放率; 当爆破开挖面上的初始地应力由 2.5 MPa 升高 12.5 MPa 时, 与未施加预应力锚索相比, 施加 3 000 kN 等级的预应力锚索后边坡突变位移分别减小了 64.2% 和 58.7%, 控制效果显著。从图 11(b) 可以看出, 随着岩体弹性模量的提高, 节理岩质边坡的突变位移逐渐减小, 这是由于在相同的应力作用下, 较高弹性模量的岩体应变较小, 岩体所存储的应变能较低, 从而使应变能释放率降低。对于弹性模量为 20 GPa 的岩体, 未施加预应力锚索和施加 3 000 kN 等级的预应力锚索情况下, 边坡突变位移由 11.2 mm 减小为 5.9 mm, 减小了 47.3%; 而对于弹性模量为 60 GPa 的岩体, 施加 3 000 kN 等级的预应力锚索后位移突变降低了 59.2%, 预应力锚索对岩体弹性模量不同的岩质边坡均体现出了较好的控制效果。由此可见, 对于地应力水平较高或岩体弹性模量较低的节理岩质边坡爆破开挖, 尤其要注意节理岩体的位移突变问题, 可考虑采用适当等级的预应力锚索进行加固。

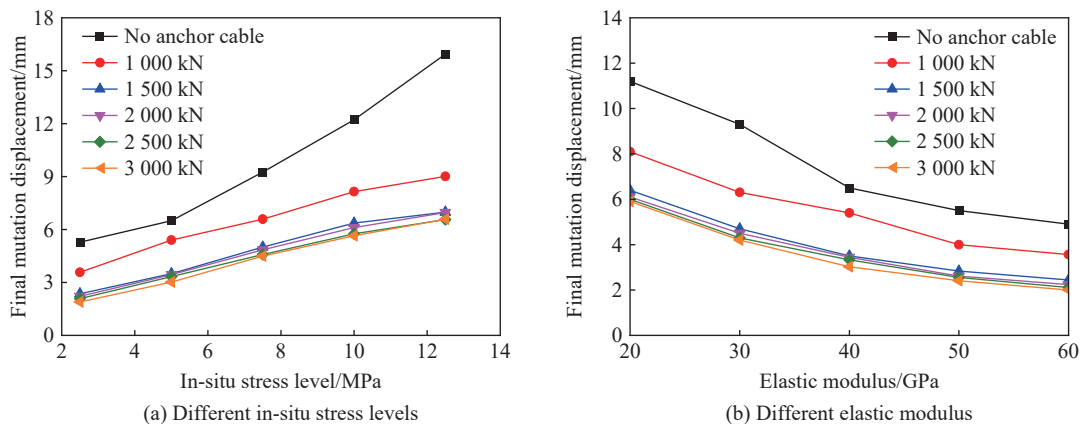


图 11 岩体地应力和弹性模量对不同等级预应力锚索作用下监测点 A 的最终突变位移的影响

Fig. 11 Effects of in-situ stress level and elastic modulus of the rock mass on final mutation displacement of the monitoring point A under different levels of the prestressed anchor cables

4 结 论

(1) 白鹤滩水电站左岸坝基锚固节理岩质边坡在爆破开挖过程中出现了明显的岩体位移突变和锚索轴力突增的现象, 二者具有同步性。

(2) 对于深切河谷底部高地应力边坡岩体爆破开挖, 爆炸荷载对岩体挤压作用所集聚的应变能以及地应力作用下岩体所存储的应变能为节理岩质边坡位移突变提供了能量来源, 爆破过程中这 2 种应变能的快速释放是节理岩体位移突变的直接诱因。

(3) 深切河谷底部高地应力边坡岩体在爆破开挖过程中产生的突变位移包括节理张开位移和岩体回弹位移, 爆破开挖面上初始地应力水平越高、岩体弹性模量越低, 产生的突变位移越大; 预应力锚索主要控制节理张开位移, 锚索预应力等级越高, 其吸能和释能速率越高, 位移突变控制效果越明显, 但当锚索的预应力等级高到一定程度后, 节理岩体的突变位移不再明显减小。

为揭示爆破开挖扰动下锚固节理岩质边坡位移突变的能量机理, 本文的数值模拟研究中做了一些简化和假定, 岩体结构面实际形态、爆破开挖扰动下岩体及锚固结构的损伤对边坡位移突变的影响还需要开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1081–1093. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.06.001.
ZHOU C B. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1081–1093. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.06.001.
- [2] 李韬, 徐奴文, 戴峰, 等. 白鹤滩水电站左岸坝肩开挖边坡稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 665–674. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0387.
LI T, XU N W, DAI F, et al. Stability analysis of left bank abutment slope at Baihetan hydropower station subjected to excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 665–674. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0387.
- [3] 代金豪, 杨建华, 胡英国, 等. 爆破荷载诱发节理岩体边坡位移突变的能量机理研究 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(2): 100–106. DOI: 10.11988/ckyyb.20191239.
DAI J H, YANG J H, HU Y G, et al. Energy mechanism of displacement's abrupt change caused by blasting load in jointed rock mass slopes [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(2): 100–106. DOI: 10.11988/ckyyb.20191239.
- [4] 马冲, 詹红兵, 姚文敏, 等. 爆破振动作用下含软弱夹层边坡稳定性及安全判据 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 563–571. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0275.
MA C, ZHAN H B, YAO W M, et al. Stability and safety criterion of a slope with weak interlayer under blasting vibration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 563–571. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0275.
- [5] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(7): 980–988. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.07.009.
DING X L, SHENG Q, HAN J, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(7): 980–988. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2002.07.009.
- [6] 李剑, 陈善雄, 余飞, 等. 预应力锚索加固高陡边坡机制探讨 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(2): 707–713. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0034.
LI J, CHEN S X, YU F, et al. Discussion on mechanism of reinforcing high and steep slope with prestressed anchor cable [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 707–713. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0034.
- [7] YOSHIDA H, HORII H. Excavation analysis of a large-scale underground power house cavern by micromechanics-based continuum model of jointed rock mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 352.e1–352.e30. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00288-8.
- [8] SHENG Q, YUE Z Q, LEE C F, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project, China [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(2): 165–184. DOI: 10.1016/

- S1365-1609(02)00015-1.
- [9] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2184–2192. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.003.
LU W B, ZHOU C B, CHEN M, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(11): 2184–2192. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.11.003.
- [10] 罗忆, 卢文波, 陈明, 等. 开挖瞬态卸荷引起的节理岩体松动模拟试验 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 2941–2947. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0591.
LUO Y, LU W B, CHEN M, et al. Simulation experiment of rockmass loosening induced by excavation load transient unloading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2941–2947. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0591.
- [11] GRAN J K, SENSENY P E, GROETHE M A, et al. Dynamic response of an opening in jointed rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(8): 1021–1035. DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00163-6.
- [12] 金李, 卢文波, 陈明, 等. 节理岩体的爆破松动机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(5): 474–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0474-07.
JIN L, LU W B, CHEN M, et al. Mechanism of jointed rock loosening under blasting load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(5): 474–480. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)05-0474-07.
- [13] YANG G H, ZHONG Z H, ZHANG Y C, et al. Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(4): 411–420. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.04.004.
- [14] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 292–297. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.03.005.
HUANG R Q. Main characteristics of high rock slopes in Southwestern China and their dynamic evolution [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 292–297. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.03.005.
- [15] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 865–878. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0933.
LIU G F, FENG X T, JIANG Q, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 865–878. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0933.
- [16] YANG J H, JIANG Q H, ZHANG Q B, et al. Dynamic stress adjustment and rock damage during blasting excavation in a deep-buried circular tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 591–604. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.010.
- [17] 陈洋, 吴亮, 陈明, 等. 高应力岩体爆破卸荷过程中应变率及应变能特征 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(10): 103202. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0225.
CHEN Y, WU L, CHEN M, et al. Characteristics of strain rate and strain energy during blasting unloading of high stress rock mass [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(10): 103202. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0225.
- [18] 杨建华, 孙文彬, 姚池, 等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7): 075202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0427.
YANG J H, SUN W B, YAO C, et al. Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 075202. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0427.
- [19] 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司. 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: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2013.
- [20] Itasca Consulting Group Inc. *FLAC^{3D} user's guide*, version 5.01 [Z]. Minneapolis, USA: Itasca, 2013.
- [21] BLAIR D P. Acoustic pulse transmission in half-spaces and finite-length cylindrical rods [J]. *Geophysics*, 1985, 50(11): 1676–1683. DOI: 10.1190/1.1441858.
- [22] DUAN B F, XIA H L, YANG X X. Impacts of bench blasting vibration on the stability of the surrounding rock masses of roadways [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 605–622. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.012.
- [23] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 266–278. DOI: 10.1016/j.tust.2013.07.007.

(责任编辑 张凌云)