

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.002

深埋地下厂房分层开挖中地应力 瞬态卸载的扰动效应*

吴亮^{1,2}, 施明³, 向晓锐², 陈洋², 梅松华¹

(1. 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 长沙 410014;

2. 武汉科技大学理学院 湖北省智能爆破技术研究中心, 武汉 430065;

3. 云南省滇中引水工程建设管理局, 昆明 650021)

摘要: 针对深埋地下厂房分层开挖工程中地应力场动态卸载诱发的安全问题, 采用动力有限元软件, 结合隐式-显式顺序求解方法研究了厂房分层开挖中围岩质点响应规律。结果表明: 地应力卸载诱发的应力波在墙脚处发生绕射并在其上方围岩中产生应力波叠加, 致使竖向质点峰值振速沿边墙向上呈现先增大后减小的衰减规律; 随着开挖深度增加, 开挖区岩体应力水平也随之增加, 卸载应力波在边脚处绕射后叠加效应更为显著; 开挖区岩体地应力卸载诱发的拱圈质点振动规律受其结构形状影响, 垂直于临空面方向的振速较大; 拱顶振速峰值受初始地应力水平与距离影响, 其值随开挖层数的增加呈现先增大后减小的规律; 地应力瞬态卸载导致保护层岩体内产生动拉应力, 其形成主要是边墙约束保护层引起卸载应力波反射所致, 该拉应力与初始应力大小成正比。

关键词: 地下厂房; 地应力; 瞬态卸载; 数值模拟

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0008-07

Dynamic Disturbance Effect in Layered Excavation of Deep Underground Powerhouse under In-situ Stress Transient Unloading

WU Liang^{1,2}, SHI Ming³, XIANG Xiao-rui², CHEN Yang², MEI Song-hua¹

(1. Hunan Key Laboratory of Key Technology on Hydropower Development, Changsha 410014, China;

2. Wuhan University of Science and Technology, College of Science,
Hubei Provincial Intelligent Blasting Technology Research Center, Wuhan 430065, China;

3. Yunnan Water Conservancy and Hydroelectric Survey, Design and Research Institute,
Kunming 650021, China)

Abstract: In order to solve the safety problem caused by dynamic unloading of in-situ stress field in the layered excavation of deep underground powerhouse, the response law of surrounding rock in the layered excavation of powerhouse is studied by using implicit-explicit sequential solution method of dynamic finite element software. The results show that the stress wave induced by in-situ stress unloading diffracts at the foot of the wall, and superposes in the surrounding rock, causing the peak velocity of particle in the vertical direction increase first but then drop along the edge wall upward. With the increase of excavation depth, the stress level of rock mass in the excavation area increases, and the superposition effect of unloading stress wave is more obvious. The vibration law of particle at arch ring rock mass induced by in-situ stress unloading is affected by its structural shape, and the vibration velocity perpendicular to free surface is larger than that of others. The peak vibration velocity of arch top is affected by the initial in-situ stress level and distance, and its value increases first but then falls with the increase of excavation layers. The reverse of in-situ stress transient unloading at the side wall results in dynamic tension stress in the rock mass of protective

layer, which is mainly caused by restraint protective layer, and the tensile stress is proportional to the initial stress.

Key words: underground hydropower station; in-situ stress; transient unloading; numerical simulation

当前,钻爆法仍是深埋地下开挖工程的主要开挖手段,开挖过程中爆破荷载会引起围岩振动并危害工程安全。根据深埋工程实测和理论研究发现,爆破开挖过程中围岩除了受爆炸荷载影响外,还将受到地应力卸载影响,且开挖前原岩应力越高,开挖时诱发岩体的振动越大^[1-3];在地应力较高的情况下,地应力动态卸载激发的振动甚至可能超过爆破振动而成为岩体振动的主要因素^[4,5];因此,对深埋岩体开挖中围岩的振动进行控制和评价时,开挖面上的地应力卸荷所激发的扰动是不容忽视的因素之一。

早在上世纪70年代,国外学者就对地应力卸荷诱发岩体振动进行了系统研究,如N G W Cook研究了岩体开挖卸荷引起的岩体微震和变形机理,提出了微震大小和地应力能量的释放速率有关^[6];J P Carter和J R Booker通过理论推算证明了长隧道快速开挖会诱发围岩振动^[7],且卸荷速率越快诱发的振动幅值越大;近年来,国内学者在地应力卸荷问题中进行了深入研究,并取得了丰硕的成果,如卢文波等研究发现在开挖面相同的情况下,地应力水平的高低对动态卸荷激发的振动大小具有决定性影响^[8];张志呈等通过试验发现岩体开挖扰动将导致应力重新分布,形成新的应力场,且主应力方向上的爆破振动值要远大于理论预测值^[9];严鹏等对瀑布沟引水隧洞爆破开挖振动测试数据进行了分析^[10],发现中、高地应力条件下,地应力瞬间释放诱发振动是爆破开挖诱发振动的重要组成部分,并在数值模拟中进行了验证;范勇等研究发现深埋隧洞爆破开挖会产生高、低双频带振动^[11],在振动评估过程中地应力瞬态卸荷产生的低频振动是不容忽视的;杨建华等通过调整钻爆参数从而控制了地应力瞬态卸荷诱发围岩振动^[12]。鉴于地下工程开挖过程中地应力卸荷诱发质点振动效应显著,施工前有必要进行相关研究。

以瀑布沟地下厂房岩体开挖为研究背景,采用有限元软件中隐式求解器对原岩应力场进行应力初始化,随后按照隐-显式序列求解方法,对地下厂房

分层开挖过程中岩体应力动态卸荷所诱发的质点振动规律进行研究,以期优化深埋岩体工程爆破设计和保障施工安全提供参考依据。

1 工程背景

瀑布沟水电站是大渡河流域水电梯级开发的下游控制性水库工程,是大渡河流域梯级水电站开发的关键项目之一。水电站地下厂房开挖规模巨大^[13],埋深达220~360 m,开挖尺寸为294.1 m×30.7 m×70.2 m(长×宽×高);开挖基岩为中粗粒花岗岩,围岩以Ⅱ、Ⅲ类岩体为主,地下厂房开挖区域地应力场是一个以构造应力为主的中等偏高的地应力场,如图1所示,地下厂房区域第一、第三主应力方向基本接近水平,第一主应力与主厂房纵轴线有20°~30°的夹角,第一、第三主应力大小分别为21.1~27.3 MPa和10.2~12.3 MPa;第二主应力方向接近垂直,其大小为15.5~23.3 MPa,该地下厂房属于中高地应力条件^[14]。

2 计算模型的建立

2.1 计算模型

目前,国内大型水电站地下厂房的开挖方式往往采用自上向下分层分区钻爆开挖,分层分区开挖程序示意图见图1(a)。除第Ⅰ层顶拱采用中洞扩挖方式开挖外,其余各层均采用中深孔台阶爆破开挖。其中,第Ⅲ~Ⅶ层开挖深度分别为6.4 m、7.8 m、6.8 m、6.8 m、6.8 m;层中开挖都采用中部拉槽方式开挖,拉槽宽度18.8 m,开挖进尺8 m;两侧保护层滞后中部拉槽区20 m开挖,保护层厚度均为4 m。由于地下厂房受构造应力(第二、三主应力)影响,在厂房水平横向上的岩体在开挖时会受到很大夹制作用。因此,开挖时通常采用大药量或大孔径进行爆破开挖,从而克服岩石的夹制作用,为减少大药量爆破对厂房边墙的影响,需要预留一定厚度的保护层以确保边墙质量。一般在同一层岩体开挖中选用“先中部拉槽,再两侧扩挖”的程序,钻爆开挖过程中的布孔方式如图1(b)所示,爆破过程采用2#岩石炸药,孔间距为2.1 m,排间距为2 m;开挖区域岩体采用分段延时爆破,排中两段延时,排间四段延时,整个爆破过程有8个阶段,每阶段雷管段数依次选取为MS1、MS3、MS5~MS15。

选取Ⅲ~Ⅶ层的岩体开挖为研究对象。厂房开

收稿日期:2020-06-02

作者简介:吴亮(1980-),男,博士,副教授,主要从事工程爆破与岩石动力学研究,(E-mail)wuliangwust@sina.com。

基金项目:水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金项目(PKLHD201801);国家自然科学基金项目(51779193,51979205)

挖计算模型如图2所示,计算采用三维模型,尺寸为200 m×200 m×60 m。岩体开挖前,模型网格划分后共322 320个单元,隐式采用Solid185单元,转换成显式后采用Solid164单元,隐-显式求解过程中模型的网格划分及材料参数均相同。计算步骤以第IV层开挖为例,如图3所示。在第III层岩体开挖完成后,将该层删除,并进入第IV层的静力分析。在第IV

层中部岩体拉槽进尺20 m条件下进行静力分析,动力分析为中部拉槽区开挖进尺为8m时的应力卸载。围岩质点振速监测点均布置在开挖进尺方向24 m且与厂房纵轴方向垂直的平面上。为比较不同开挖层开挖卸荷后围岩的振动响应,所有开挖层的开挖尺寸和开挖位置都遵照图3设置。

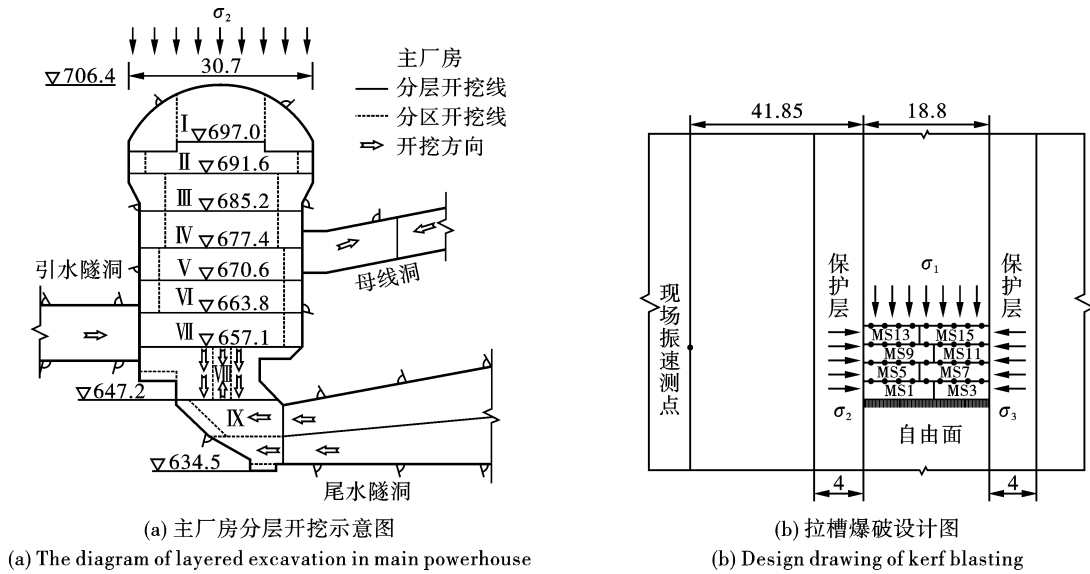


图1 瀑布沟水电站地下厂房开挖程序和主应力示意图^[14](单位:m)

Fig. 1 Excavation procedure and principal stress diagram of Pubugou underground powerhouse^[14](unit:m)

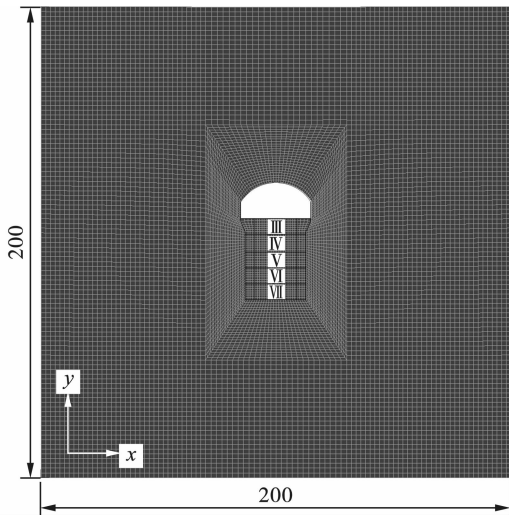


图2 厂房分层开挖计算模型(单位:m)

Fig. 2 The layered excavation calculation model of powerhouse(unit:m)

2.2 计算方法

由于计算模型需在岩体开挖之前的静应力状态下进行应力动态卸载,可见该计算过程是一个静力与动力荷载共同作用的过程,该过程可以通过有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 的隐式-显式顺序求

解功能进行求解。

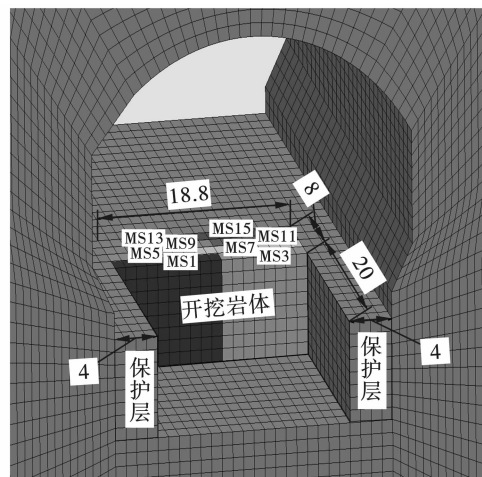


图3 第IV层开挖计算模型图(单位:m)

Fig. 3 The excavation calculation model of Layer IV(unit:m)

首先运用 ANSYS 的隐式计算功能,计算地下厂房岩体的静态应力场,随后对该静态应力场进行初始化,将其作为动态开挖前的初始条件,接着将单元类型由隐式转换成显式,并进入显式求解器。动力计算中开挖区域岩体的挖除采用失效单元,通过

* MAT_ADD_EROSION 关键字中设置单元失效时间。开挖区岩体挖出过程与爆破过程相同,分八个阶段挖出,每个阶段起爆后岩体依次向自由面推出,推出的岩体部分即为数值计算挖出的部分,各阶段岩体挖出时间对应每个阶段雷管延期时间。由于开挖区域单元被挖除导致模型边界突变,原有的静应力平衡状态将被打破,进而激发围岩振动。

2.3 计算荷载及参数

根据瀑布沟水电站地下厂房的构造应力水平和分布情况,本文选取竖直远场地应力为 $\sigma_y = 20 \text{ MPa}$,取水平横向远场地应力为 $\sigma_x = 10 \text{ MPa}$,由于开挖台阶自由面的存在,厂房纵轴方向上地应力在开挖卸荷计算中不予考虑。地应力荷载施加示意图见图 4 所示,其中 y 方向上边界施加竖直地应力 σ_y ,下边界固定约束, x 方向上两侧边界施加水平横向地应力 σ_x , z 方向两侧边界为无反射边界。开挖区岩体卸荷采用瞬态卸荷方式。瀑布沟水电站地下厂房围岩由微风化~新鲜中粒花岗岩组成,地下水对节理的作用较弱。由于本文重点关注围岩振动响应,因此数值模拟中岩石材料模型采用线弹性,忽略结构面影响,具体材料参数如表 1 所示。

表 1 岩体参数^[15]

Table 1 Parameters of rock mass^[15]

岩体弹性 模量 E/GPa	岩体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
18	2840	0.2	4500

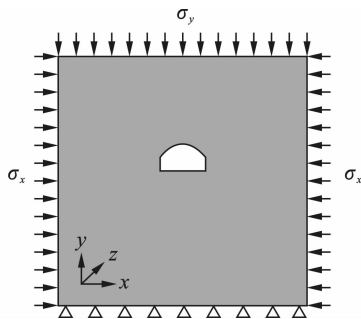


图 4 地应力加载示意图

Fig. 4 Diagram of In-situ stress loading

3 计算结果分析

通过隐式求解器对每一层开挖前应力场进行静力求解,确定每层开挖区域应力状态及厂房围岩变形情况。在地下厂房第 I 和 II 层已开挖的前提下,开挖区竖直方向上形成了自由面,因此,在分析 III~VII 层中部岩体开挖时,开挖区岩体主要受水平地应力作用。计算结果表明:随着开挖深度增加,厂房边

墙围岩向自由面的变形越来越大,底板向内挤压越来越明显。考虑到初始应力场竖直地应力比水平地应力大,在厂房开挖断面较小时,由于泊松效应,竖直地应力会抑制厂房围岩发生水平位移;随着开挖深度的增加,开挖断面不断扩大,边墙高度增加,围岩变形加大;另外,由于水平方向受力面减少,开挖区水平应力随之增加,因此,随着开挖深度的增加,开挖区岩体所受水平应力越来越大。根据静力计算结果,III~VII 层开挖前开挖面 x 方向上的最大应力分别为:9.763 MPa、14.349 MPa、15.706 MPa、17.667 MPa、19.446 MPa。

3.1 卸载诱发的拱圈振动衰减规律

为揭示厂房开挖中地应力卸载诱发的振动规律,本文选取了第 III 层中部拉槽时 MS1 段岩体挖出后拱圈各质点的振速峰值,从拱脚向拱顶依次选取 7 个振速监测点,见图 5 所示。开挖卸荷诱发的顶拱各监测点的质点峰值振速见图 6。结果表明:水平向和竖直向质点峰值振速在临近开挖区的 1#测点最大,由拱脚向拱顶峰值振速迅速衰减,且拱脚处以水平振速较大,而拱顶以竖直振速较大。

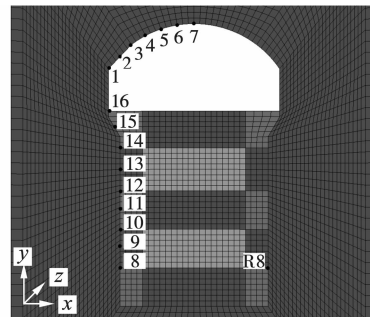


图 5 拱圈及边墙监测点

Fig. 5 Arch ring and side wall monitoring points

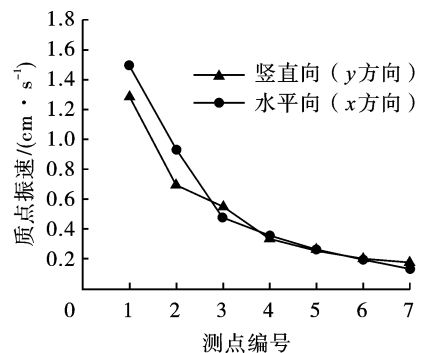


图 6 第 III 层开挖时厂房顶拱各测点峰值振速

Fig. 6 Peak vibration velocity of side wall during excavation of Layer III

由静力分析可知,开挖区岩体主要以水平向地应力为主,因此开挖瞬态卸荷后岩体内激发的水平

向应力波要比竖直向强,水平向应力激发的应力波沿 x 方向迅速衰减,在开挖近区边脚处质点振速水平振速大于竖直向;随后应力波在边脚处发生绕射,形成面波沿着边墙向上传播,随着距离的增加,质点振动峰值迅速衰减。

根据拱顶处质点振动特点,将 III ~ VII 层各层 MS1 段开挖时的拱顶振速峰值进行汇总,如图 7 所示。结果显示:各层开挖中顶拱振速均表现出竖直向振速大于水平向,随着开挖层数的增加,拱顶质点峰值振速随着开挖层数的增加呈现出先增大后减小的规律。开挖层数增加后开挖区地应力随之增加,开挖卸荷后开挖近区岩体振动增大,但扰动源与拱顶的距离也会随之增加,因此拱顶质点峰值振速会随着开挖层数的增加先增大后减小。

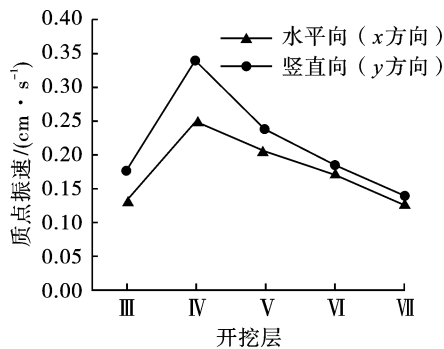


图 7 各层开挖时厂房拱顶(7#测点)质点峰值振速
Fig. 7 Peak vibration velocity at the vault(7# measuring point) of powerhouse during excavation of each layer

3.2 卸载诱发的边墙振动衰减规律

研究表明,地应力水平与边墙高度均与开挖深度成正比,地应力动态卸载诱发的振动愈加强烈。本节对第 VII 层中部拉槽开挖诱发的边墙各质点振速进行了分析。计算中沿边墙向上依次选取 8# ~ 16# 九个振速监测点,见图 5 所示,各监测点的振速峰值见图 8。计算结果显示,水平向质点峰值振速在边脚处(8#测点)最大,随后向上迅速衰减;竖直向质点峰值振速在开挖区边脚上方 9#测点处最大,质点

峰值振速由边脚向上先增大后减小。这是由于高应力区岩体开挖后应力波在边脚处发生绕射,随后在边脚上方附近产生应力波叠加,竖直向振速也将随之放大。因此,竖直向质点峰值振速沿边墙向上呈现先增大后减小的衰减规律,且该规律在第 III ~ VI 层开挖过程中都得到了验证;随着开挖深度增加,开挖区岩体应力水平也随之增加,卸载应力波在边脚处绕射后叠加效应更为显著。

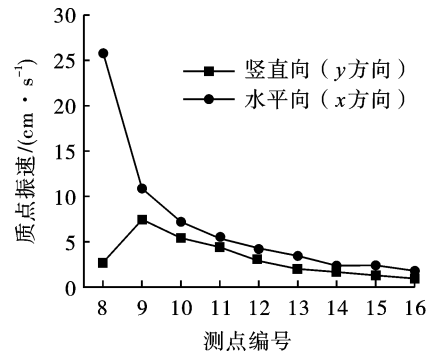


图 8 第 VII 层开挖时厂房边墙上各测点峰值振速
Fig. 8 Peak vibration velocity of side wall during excavation of layer VII

3.3 卸载诱发的动应力

分层开挖过程中每层开挖后边脚处质点振速峰值与动应力计算结果见表 2。计算结果表明:开挖前岩体水平向应力大小与开挖深度成正比,开挖时地应力瞬态卸载导致保护层岩体内动拉应力的产生,该拉应力的形成主要是边墙约束保护层引起卸载应力波反射所致;另外,拉应力大小主要受开挖区岩体初始水平应力大小的影响,即初始应力与卸荷产生的拉应力成正比。实际工程中,第 VI 开挖区水平向地应力约为 12.3 MPa,数值模拟结果为 14.3 MPa,由于模拟中没考虑节理、裂隙等因素,以及提取地应力时考虑的是岩体内最大应力,因此模拟计算结果偏大^[4]。在动力计算中由于地应力采用瞬态卸载,因此,卸后围岩振速较实际偏大,但分层开挖时地应力卸载信息基本保留。

表 2 开挖近区岩石动力响应计算结果

Table 2 Calculation results of rock dynamic response near excavation

开挖层号	边脚处质点峰值振速/(cm·s ⁻¹)			开挖前保护层岩体内最大压应力/MPa	开挖时保护层岩体内最大拉应力/MPa
	监测点	水平向	竖直向		
III	16#	11.249	1.705	9.763	0.822
VI	14#	21.381	2.526	14.349	1.278
V	12#	21.120	2.167	15.706	1.422
VI	10#	23.359	2.393	17.667	1.739
VII	8#	25.854	2.711	19.446	1.952

3.4 工程例证

以第Ⅶ层中部拉槽开挖为例,如图5所示。为对比开挖卸荷后开挖区两侧保护层振动响应情况,在第Ⅶ层开挖区两侧保护层取8#和R8#两个监测点。开挖区两侧保护层处监测点的振速时程曲线见图9。结果显示,靠近地应力先卸载一侧的保护层振动速度要大于另一侧;开挖区岩体主要受水平横向地应力作用,并储存大量弹性应变能,该应变能的

释放以应力波形式向外传播,由于每排炮孔均分两段起爆,因此地应力都将发生两次卸载并激发围岩两次振动。例如,MS1段激发应力波会向两侧保护层传播,而MS3段激发应力波则只能向一侧传播,图9结果显示,每排第一阶段卸载后两测点均有明显振动信号,而在第二阶段卸载后只有近开挖区测点有明显振动信号。

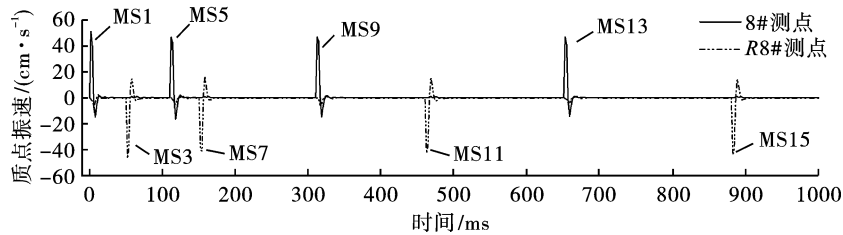


图9 第Ⅶ层开挖时开挖区两侧保护层测点振速曲线

Fig. 9 Vibration velocity curve of protective layer on both sides of excavation area during excavation of layer VII

根据文献[4]的现场某次振速测试,得到了第Ⅳ层爆破开挖后某测点的振速曲线,该测点距爆区41 m处[图1(b)所示],位于第三主应力方向上,振速曲线如图10所示。通过对振速曲线分析发现,开挖后围岩的振动是由爆破冲击和地应力卸载两部分组成。振速曲线表明:第1排炮孔的MS1段起爆后所激发的振动要大于MS3段,其原因一是由于MS1

段的药量大于MS3阶段,其二是MS1段起爆后该方向上的地应力产生卸载;第2排MS5段起爆后所激发的振动和MS7段相当,而在MS5段药量小于MS7段的情况下,爆后振速相当,也证明每排先起爆时地应力产生了卸载。应力卸载方向实测振速曲线和模拟振速变化趋势基本相似,因此也例证数值模拟的合理性。

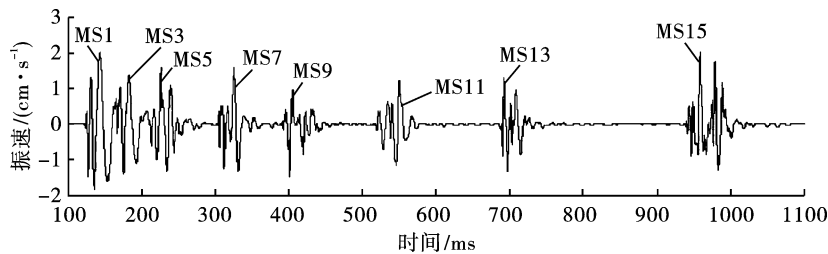


图10 厂房第Ⅳ层开挖实测围岩振动时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of surrounding rock vibration measured during excavation in the IV floor of Powerhouse

3.5 实施效果

根据数值模拟及工程实例可知,在深埋地下厂房爆破开挖过程中,开挖后围岩除了爆破冲击荷载带来的扰动外还将受到地应力瞬态卸载影响,并表现出开挖区域所受地应力越大开挖后围岩受到扰动作用越大。在地下厂房自上而下分层开挖过程中,随着开挖层数的增加,开挖区受到地应力挤压作用越明显,开挖后引起近区围岩振动明显。在拱顶、拱脚部位,其峰值振速受离开挖区的距离和地应力制

约,随着开挖层数的增加,振速表现出先增大后减小。因此,在实际工程中,通过改善装药结构和孔间距等钻爆参数来增加卸荷时长,从而有效地控制地应力动态卸荷所诱发的扰动效应。另外,针对拱顶、拱脚等薄弱部位,进一步加强了监测及支护。工程监测结果显示^[16]:围岩裂缝(见图11)、形变等均在正常范围内。主厂房及安装间室监测成果统计见文献[17],变形较大部位一般出现在侧墙的上部,例如主厂房的岩锚梁部位附近。

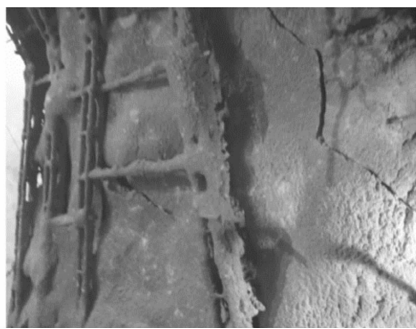


图 11 裂缝现场资料^[16]

Fig. 11 Field data of crack^[16]

4 结论

采用动力有限元软件,结合隐式-显式顺序求解方法研究了深埋地下厂房分层开挖中地应力场动态卸载诱发的围岩响应规律,得到以下结论:

(1)地应力卸载诱发的拱圈质点振动规律受其结构形状影响,垂直于临空面方向的振速较大;随开挖层数的增加,拱顶振速峰值受初始地应力水平与距离影响,质点振速峰值呈现先增大后减小的规律。

(2)地应力卸载诱发的应力波在边脚处发生绕射,随后在边脚上方附近产生应力波叠加致使竖向振速峰值放大。因此,竖向向质点峰值振速沿边墙向上呈现先增大后减小的衰减规律;随着开挖深度增加,开挖区岩体应力水平也随之增加,卸载应力波在边脚处绕射后叠加效应更为显著。

(3)地应力瞬态卸载导致保护层岩体内动拉应力的产生,该拉应力的形成主要是边墙约束保护层引起卸载应力波反射所致;卸荷产生的拉应力与初始应力大小成正比。

需要说明的是本文开挖区岩体采用单元定时失效方法进行挖除,其开挖后地应力瞬间完成卸载,因此计算结果有较高的安全裕度。另外,尚未考虑爆破荷载以及爆破荷载与地应力耦合作用的情况,该问题还亟待进一步讨论。

参考文献 (References)

[1] CAO Wen, LI Xi-bing, MING Tao, et al. Vibrations induced by high initial stress release during underground excavations[J]. *Tunnelling Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2016, 53:78-95.

[2] 肖思友,姜元俊,刘志祥,等.高地应力下硬岩爆破破岩特性及能量分布研究[J]. *振动与冲击*, 2018(15): 143-149.

[2] XIAO Si-you, JIANG Yuan-jun, LIU Zhi-xiang, et al. Hard rock blasting energy distribution and fragmentation characteristics under high earth stress[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018(15): 143-149. (in Chinese)

[3] 杨建华,吴泽南,姚池,等.地下洞室爆破开挖诱发围岩损伤特性及PPV阈值研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(2): 136-144.

[3] YANG Jian-hua, WU Ze-nan, YAO Chi, et al. Characteristics and PPV thresholds of rock damages under underground blasting excavation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(2): 136-144. (in Chinese)

[4] 杨润强,严鹏,王高辉,等.地应力水平对深埋隧洞爆破振动频谱结构的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 118-129.

[4] YANG Run-qiang, YAN Peng, WANG Gao-hui, et al. Effect of in-situ stress level on frequency spectrum of blasting vibration in a deep-buried tunnel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 118-129. (in Chinese)

[5] 杨建华,姚池,卢文波,等.深埋隧洞钻爆开挖围岩振动频率特性研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1195-1202.

[5] YANG Jian-hua, YAO Chi, LU Wen-bo, et al. Vibration frequency characteristics of surrounding rock of deep tunnel induced by borehole-blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1195-1202. (in Chinese)

[6] COOK N. Seismicity associated with mining[J]. *Engineering Geology*, 1976, 10(2-4): 99-122.

[7] CARTER JP, BOOKER JR, editors. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*; 1990; Pergamon.

[8] LU Wen-bo, LI Peng, CHEN Ming, et al. Comparison of vibrations induced by excavation of deep-buried cavern and open pit with method of bench blasting[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(5): 1709.

[9] 张志呈,肖正学,胡健,等.岩体爆震传播时应力场的波导效应试验研究[J]. *化工矿物与加工*, 2005, 34(7): 21-24.

[9] ZHANG Zhi-cheng, XIAO Zheng-xue, HU Jian, et al. Experimental study on the wave transmission effect of the initial stress field as transmitting of quake wave from rock blasting[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2005, 34(7): 21-24. (in Chinese)