

大型船闸开挖预裂爆破累积损伤特性及隔振效果分析

胡浩然, 周海孝, 张玉柱, 李冬冬, 张宸

Analysis of damage accumulating characteristics and vibration isolating effect of presplitting blasting in excavation of large-scale navigation lock

HU Haoran, ZHOU Haixiao, ZHANG Yuzhu, LI Dongdong, ZHANG Chen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211118003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑爆破累积损伤效应的含泥化夹层边坡滑移分析

Analysis on sliding displacement of slope with muddy intercalation considering blasting cumulative damage effect
水利水电工程学报. 2021(1): 104 <https://doi.org/10.12170/20200127001>

岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析

Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks
水利水电工程学报. 2018(5): 95 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.014>

高桩码头对邻近爆破的非线性动力响应分析

Nonlinear dynamic response analysis of blasting to adjacent high-pile wharf
水利水电工程学报. 2018(1): 66 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.010>

定向爆破堆石坝应力变形特性研究

Stress-deformation behavior of a blast-fill dam
水利水电工程学报. 2020(5): 86 <https://doi.org/10.12170/20190930001>

基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究

Study on section size of large navigation tunnel based on objective optimization
水利水电工程学报. 2021(3): 1 <https://doi.org/10.12170/20210301004>

基于GIS的大型灌区移动智慧管理系统研发

Development of mobile intelligent management system for large-scale irrigation district based on GIS
水利水电工程学报. 2019(4): 50 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.007>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211118003

胡浩然, 周海孝, 张玉柱, 等. 大型船闸开挖预裂爆破累积损伤特性及隔振效果分析 [J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 104-111. (HU Haoran, ZHOU Haixiao, ZHANG Yuzhu, et al. Analysis of damage accumulating characteristics and vibration isolating effect of presplitting blasting in excavation of large-scale navigation lock [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 104-111. (in Chinese))

大型船闸开挖预裂爆破累积损伤特性及隔振效果分析

胡浩然^{1,2}, 周海孝³, 张玉柱^{1,2}, 李冬冬^{1,2}, 张宸³

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 长江设计集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对大型船闸预裂爆破开挖时中隔墩振动与损伤控制的问题, 依托现场爆破试验, 对比分析了不同段主爆孔诱发振动的峰值, 采用数值模拟的方式, 研究了不同段主爆孔的爆破累积损伤特性, 分析了不同损伤范围下预裂缝的隔振效果, 并对船闸爆破开挖方案进行了优化。研究表明: 预裂爆破开挖中主爆孔爆破会对预裂缝附近岩体产生累积损伤, 但会增强对后续主爆孔的隔振效果; 随着预裂缝附近岩体累积损伤的增加, 其隔振效果逐渐增强, 并最终稳定在 50% 左右; 爆破振动峰值(PPV)衰减幅度随着损伤宽度的增加而增加, 当损伤宽度达到 4 cm 后, 衰减幅度趋于平缓。大型船闸开挖中应综合考虑预裂爆破累积损伤特性及其隔振效果, 可采用先拉槽增加侧向临空面与设置施工预裂缝的爆破开挖优化方案, 进而保证开挖效果, 并降低对保留岩体的扰动。

关键词: 大型船闸; 预裂爆破; 累积损伤; 隔振效果; 爆破方案优化

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2023)01-0104-08

船闸是水运工程中常见的过船建筑物, 主要用于克服河流上的集中水位差, 一般由上下闸首、闸门及闸室等组成^[1-3]。大型船闸修建过程中, 往往先爆破开挖两侧深槽, 待成型后再进行附属设施的施工, 而位于两侧深槽中间的保留岩体则被称为中隔墩^[4]。中隔墩两侧均为直立边坡, 且高度常达到几十米, 为减小深槽爆破开挖对保留岩体的损伤, 提高其稳定性, 多采用控制爆破的方式进行施工^[5]。预裂爆破是一种常见的轮廓控制爆破开挖方式, 开挖过程中往往先起爆预裂孔形成预裂缝再间隔起爆其余段炮孔, 以减弱后续炮孔爆破产生的应力波对保留岩体的损伤, 故预裂缝的隔振效果对保留岩体的稳定性至关重要^[6]。此外, 不同段主爆孔爆破会对预裂缝附近岩体产生损伤, 而岩体损伤的累积一定程度上也会影响预裂缝的隔振效果。

关于预裂缝隔振效果的研究方面: 卢文波等^[7]推导了预裂缝在爆炸应力波作用下闭合及充水条件下的隔振比例; 周春华等^[8]借助小波变换模型极大值的方法分析了减震沟与预裂缝的减振效果; 王利军等^[9]则通过数值模拟的方式分析了不同减震沟参数条件下的减振比例, 并提出了相应的优化方案。此外, 关于爆破累积损伤的研究方面: 褚怀保等^[10]借助室内试验, 分析了不同损伤程度下爆破振动随距离的衰减规律; 杨小林等^[11]通过现场试验比较了隧道台阶法开挖中, 累积损伤对爆破振动传播的影响; 胡英国等^[12]利用自定义拉压损伤模型, 研究了预裂爆破中不同类型炮孔对保留岩体产生的损伤。

综上, 针对预裂缝的隔振效果及爆破损伤累积特性的研究较多, 而综合考虑主爆孔爆破损伤累积对预裂缝隔振效果影响的研究鲜有报道。本文依托三峡工程中大型船闸爆破开挖, 比较不同段主爆孔爆破诱发振动峰值, 借助数值模拟研究不同段主爆孔的爆破累积损伤特性, 分析不同损伤范围下预裂缝的隔振效果, 并对大型船闸爆破开挖的优化方案进行探讨。研究结果可为大型船闸爆破开挖时中隔墩的振动与损伤控制提供参考。

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-258); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(300102210123)

作者简介: 胡浩然(1991—), 男, 安徽舒城人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程设计相关工作。
E-mail: huhaoran@cjsjy.com.cn 通信作者: 周海孝(E-mail: hxzhou@chd.edu.cn)

1 现场爆破试验

1.1 工程概况

三峡水电站位于湖北省宜昌市, 建成于 2009 年, 总装机容量为 2 250 万 kW, 年发电量约为 1 000 亿 kW·h, 是世界上规模最大的水电站。大坝临时船闸及升船机部位岩质边坡最大开挖深度可达 140 m, 且在升船机承船厢塔柱、下闸首及临时船闸主体之间保留有长达 350 m 的中隔墩。中隔墩两侧均为直立边坡, 高度分别为 23 和 36 m, 其中临时船闸一侧深槽先于升船机一侧开挖完成, 为研究预裂爆破中预裂缝的隔振效果, 依托升船机一侧爆破开挖, 开展了相关预裂爆破试验。

1.2 试验设计

如图 1 所示, 本次试验共钻设 4 排爆破孔, 由前往后依次为 3 排主爆孔及 1 排预裂孔。试验过程中先起爆预裂孔, 待形成预裂缝后再依次起爆不同排主爆孔。3 排主爆孔爆破参数基本相同, 均采用耦合装药, 单孔单响, 由起爆雷管底端引爆, 且最大单响药量控制在 70 kg; 预裂孔采用径向不耦合装药, 使用导爆索侧向引爆, 最大单响药量控制在 30 kg, 3~4 个炮孔为 1 段。炮孔长度均设置为 10 m, 其中主爆孔堵塞长度为 3 m, 炮孔排距为 3 m, 预裂孔堵塞长度为 1 m, 距离最近一段主爆孔距离为 1 m。为监测不同排炮孔爆破诱发振动, 于爆区正后方 13 m 位置处布置了 2 个振动监测点。具体位置分布如图 2 所示。

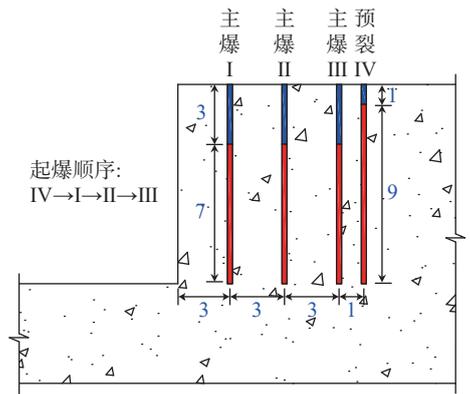


图 1 炮孔布置(单位: m)

Fig. 1 Layout of boreholes (unit: m)

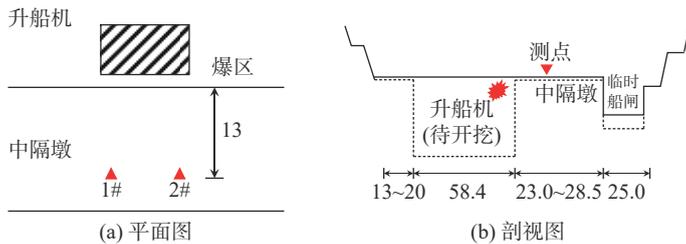


图 2 振动测点分布(单位: m)

Fig. 2 Layout of monitoring points (unit: m)

1.3 试验结果分析

图 3 为典型测点的振动时程曲线。可见, 时程曲线分为 4 段, 且各段振动波形分界清晰。第 1 排主爆孔爆破诱发的爆破振动峰值 (peak particle velocity, PPV) 最大为 16.90 cm/s, 其次为预裂孔, 爆破诱发的 PPV 为 12.15 cm/s, 第 2、3 排主爆孔爆破诱发的 PPV 分别为 7.80 和 9.20 cm/s。这主要是由于主爆孔最大单响药量大于预裂孔, 而第 1 段主爆孔爆破后加大了预裂缝附近岩体的损伤, 增强了预裂缝的减振效果。因此, 预裂孔诱发振动相对第 1 段主爆孔诱发振动略小, 但大于第 2 段及第 3 段主爆孔诱发振动。

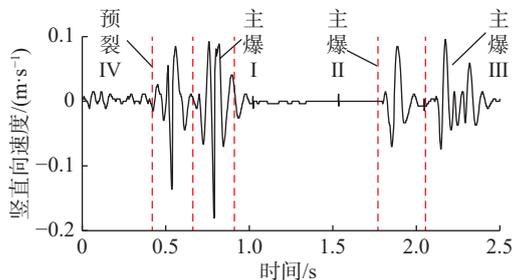


图 3 典型测点振动时程曲线

Fig. 3 Typical blast vibration velocity time-histories

此外, 图 4 统计了各段炮孔在不同测点、不同方

向上诱发 PPV 的差异。由图 4 可知,第 1 段主爆孔爆破诱发 PPV 明显大于第 2 段及第 3 段,以 1#测点为例,第 1 段主爆孔诱发竖直向 PPV 为 16.90 cm/s,约为第 2 段主爆孔诱发 PPV 的 2.3 倍,为第 3 段的 1.8 倍。相比于第 2 段主爆孔,第 3 段主爆孔与测点距离更近,故第 3 段主爆孔诱发的 PPV 要稍大于第 2 段。此外,竖直向的 PPV 大于水平向的,是不同方向上爆破地震波的波型与组分差异造成的^[13-14]。

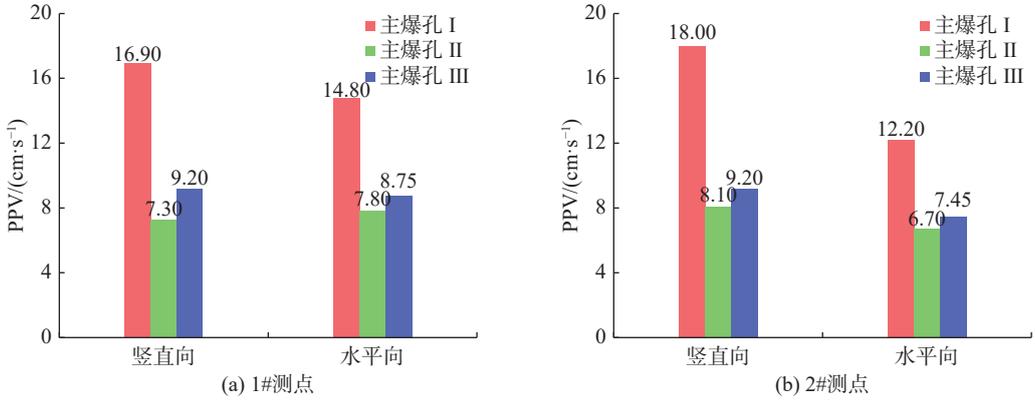


图 4 不同段主爆孔爆破诱发的 PPV 比较

Fig. 4 Comparison of PPV induced by different rows of production boreholes

2 爆破累积损伤及隔振效果数值模拟分析

2.1 模型建立及参数验证

参照现场试验建立数值计算模型如图 5 所示。模型尺寸为 28 m×5 m×15 m,前方及上方均设置为自由面,其余边界设置无反射边界条件以消除反射波的影响。炮孔直径为 90 mm,炮孔长度为 10 m,堵塞为 3 m,预裂缝宽度设置为 2 cm,各炮孔间距为 2.5 m,预裂缝距最后一段主爆孔距离为 1 m。

主爆孔起爆后,产生的应力波会在预裂缝前方反射形成拉伸波造成岩体损伤,且随着主爆孔的起爆,损伤程度会明显增加,故建立了不同损伤范围内的数值模型,计算分析主爆孔爆破累积损伤特性及不同损伤范围下预裂缝的隔振效果。参考现场试验测点布置,于预裂缝后方 13 m 处设置振动测点。

模型中预裂缝宽度设置为 2 cm,采用空气进行填充,考虑炮孔爆破后预裂缝附近岩体会产生损伤,故以预裂缝为中心向两边一定范围内填充损伤弱化后的岩体材料,填充宽度(*d*)分别设置为 2、4、6 和 8 cm。采用 JWL 状态方程(式(1))模拟炸药的爆轰过程,参考文献 [15],具体参数取值见表 1。

$$P_d = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

表 1 炸药主要参数

Tab. 1 Parameters of explosive in numerical models

密度/(kg·m ⁻³)	初始爆轰速度/(m·s ⁻¹)	初始爆轰压力/GPa	<i>A</i> ₁ /GPa	<i>B</i> ₁ /GPa	<i>R</i> ₁	<i>R</i> ₂	<i>ω</i>
1 000.00	5 000.00	5.15	49.40	1.89	3.90	1.11	0.33

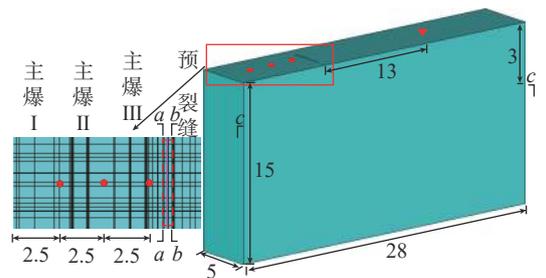


图 5 数值计算模型(单位: m)

Fig. 5 Numerical model (unit: m)

式中: P_d 为爆轰产物的压力; A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为与炸药性质相关的独立常数; V 为爆轰产物的相对体积; E_0 为初始体积内能。

采用 RHT 本构模型模拟岩石, 该模型考虑了应变硬化、软化和应力偏量第三不变量的影响, 能够描述脆性材料从弹性到失效的整个过程, 被广泛用来模拟冲击荷载下混凝土和岩石的动力响应特性及损伤断裂。其失效方程为:

$$\begin{cases} \sigma_e^*(P, \theta, \varepsilon) = Y_T^*(P)R_3(\theta)F_r(\varepsilon) \\ Y_T^*(P) = A(P^* - P_s^*F_r(\varepsilon))^N \\ P_s^* = P_s/f_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_e^* 为失效面等效应力强度; P 、 θ 、 ε 分别为压力、Lode 角和应变率; $R_3(\theta)$ 为偏平面上的角偶函数; $F_r(\varepsilon)$ 为应变率强化因子; $Y_T^*(P)$ 为压缩子午线上的等效应力强度; P^* 为标准化静水压力; A 、 N 为材料常数; f_c 为单轴抗压强度; P_s^* 为归一化层裂强度; P_s 为层裂强度。

此外, RHT 模型在 Holmquist 和 Johnson 本构模型损伤演化准则基础上, 引入了损伤变量 D 来描述参数失效面, 并假定损伤是非弹性应变的累积, 表达式如下:

$$\begin{cases} D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \\ \varepsilon_p^f = D_1(P^* - P_s^*)^{D_2} \geq \varepsilon_f^{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为塑性应变增量; ε_p^f 为失效应变; D_1 、 D_2 为损伤常数; ε_f^{\min} 为最小失效应变。参考文献 [12], 岩石 RHT 本构模型参数取值见表 2。通过改变体积模量的方式来模拟损伤弱化后的岩体损伤效果, 故未损伤岩体体积模量设为 35.20 GPa, 损伤弱化后岩体体积模量设为 17.60 GPa。

表 2 RHT 模型主要参数取值

Tab. 2 Parameters used in the RHT model for rock

密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗压强度/MPa	损伤常数 D_1	损伤常数 D_2	完整失效面常数 A	完整失效面指数 N
2 750.00	35.20	16.70	35.00	0.04	1.00	1.60	0.61

采用空气作为不耦合介质, 状态方程选用 *EOS_IDEAL_GAS 定义, 主要参数取值为初始密度 $\rho=1.22 \text{ kg/m}^3$; 比热容 $C_{p0}=717.60 \text{ J/(kg·K)}$; 基准温度 $T_0=288.20 \text{ K}$; 初始相对体积 $V_0=1.00$ 。

为验证所选参数可靠性, 建立含有单排预裂孔的计算模型, 具体见图 6。提取了爆区正后方 13 m 位置处的振动时程曲线, 并与 2#测点预裂孔爆破诱发的振动进行对比(图 7)。从图 7 可见, 数值模拟计算 PPV 为 17.20 cm/s, 略大于实测 PPV(13.60 cm/s), 应是岩体本身存在大量微裂隙, 对爆破振动起到了一定的滤波作用。但数值计算爆破振动波形与实测波形基本吻合, 说明本文所选模型参数合理。

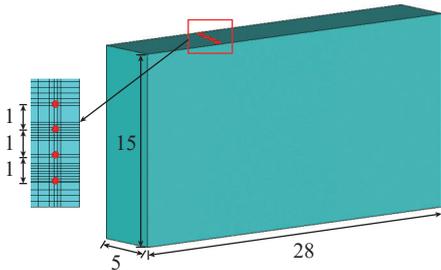


图 6 验证模型(单位: m)

Fig. 6 Validation of numerical model (unit: m)

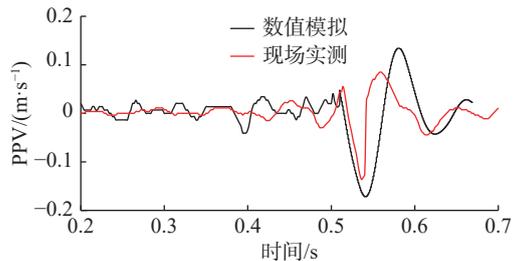


图 7 计算结果与现场监测对比

Fig. 7 Comparison of numerical and experimental results

2.2 数值计算结果分析

2.2.1 主爆孔爆破累积损伤特性 图 8 提取了不同段主爆孔爆破 $c-c$ 横截面上的损伤累积分布。由图 8 可知, 随着主爆孔依次起爆, 岩体累积损伤范围逐渐增加, 且受自由面反射拉应力波的影响, 抵抗线方

向岩体的损伤范围较大。此外,预裂缝具有明显的隔振效果,第1段主爆孔爆破后,产生的应力波会在预裂缝位置形成反射,受反射拉应力波的影响,预裂缝左侧附近岩体损伤明显增加。且随着主爆孔依次爆破,岩体累积损伤范围逐渐增加,但预裂缝附近岩体损伤并未发生明显变化。由此可见,主爆孔 I 是造成预裂缝附近岩体损伤的主要原因。

图 9 为截取的预裂缝两侧(图 5)的损伤云图,其中 $a-a$ 断面位于填充范围左侧, $b-b$ 断面位于填充范围右侧。由图 9 可知, $a-a$ 断面的累积损伤明显大于 $b-b$ 断面,且累积损伤主要集中在断面中间区域,而 $b-b$ 截面累积损伤主要分布于截面两侧,中间位置损伤相对较小,这表明预裂缝的产生抑制了爆破损伤的发展。此外,当损伤宽度为 6 cm 时, $a-a$ 断面的损伤程度及范围与损伤宽度为 2 cm 时基本一致,但 $b-b$ 断面形成的损伤相对较小,这表明随着损伤范围的增加,预裂缝对损伤发展的抑制作用亦随之增大。

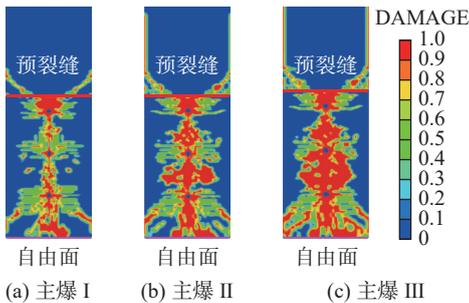


图 8 不同段主爆孔爆破横截面累积损伤分布

Fig. 8 Accumulating damage at different cross sections induced by different rows of production boreholes

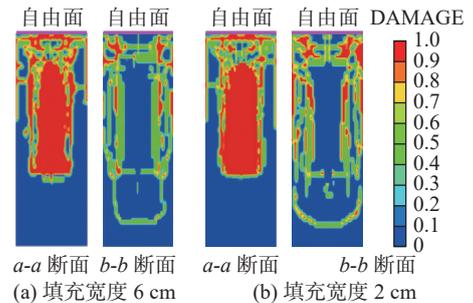


图 9 主爆孔爆破纵截面累积损伤分布

Fig. 9 Accumulating damage at different longitudinal sections induced by production boreholes

2.2.2 预裂缝隔振效果分析 不同段主爆孔爆破会对预裂缝附近岩体产生损伤,尤其是第 1 段主爆孔,而不同损伤范围下预裂缝隔振效果亦有不同。图 10 比较了不同损伤范围下的 $a-a$ 断面及 $b-b$ 断面的 PPV。可见,不同损伤范围下, $a-a$ 断面的振动峰值基本维持在 1.30 m/s 左右,但 $b-b$ 断面振动峰值存在显著差异,且随着填充范围的增加而逐渐减小。当损伤区宽度为 4 cm 时,预裂缝隔振效果为 35.7%,当损伤区宽度为 6 和 8 cm 时,其隔振效果分别为 51.7% 和 52.4%。这表明损伤范围的增加一定程度上能够提升预裂缝的隔振效果。

图 11 为不同损伤范围下测点(图 5)位置处的振动峰值。可见,无损伤条件下,测点振动峰值最大为 0.20 m/s,当损伤范围为 8 cm 时,振动峰值为 0.09 m/s,减小振动峰值约为 54%。当损伤范围小于 4 cm 时,随着损伤范围的增加,振动峰值的减小速度较快,而损伤范围大于 4 cm 时,振动峰值的减小速度减缓。由此可见,随着损伤范围的增加,其隔振效果有一定提升,但当损伤范围增加到一定值以后,随着损伤范围的增加,隔振效果的提升并不显著。

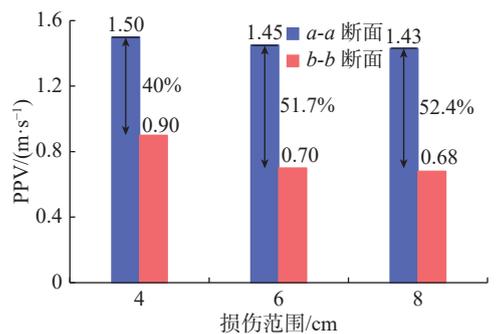


图 10 不同损伤范围下减振比例

Fig. 10 Vibration isolation proportions under different widths of damage zone

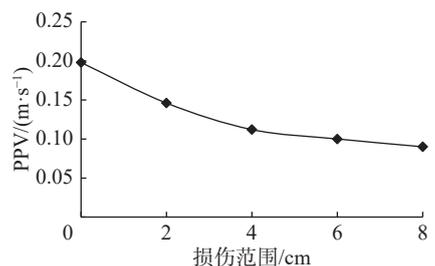


图 11 不同损伤范围下 PPV 分布

Fig. 11 PPV distribution under different widths of damage zone

2.3 爆破开挖方案优化探讨

中隔墩两侧边坡直立,且高度常达到几十米,故多通过预裂爆破的方式降低对保留岩体的损伤。预裂爆破开挖过程中,一般先起爆预裂孔形成预裂缝再依次起爆其余段炮孔,预裂缝虽能减弱主爆孔爆破产生应力波强度,但预裂孔在单自由条件下起爆,炮孔所受夹制作用较强,其本身爆破产生的损伤相对较大,损伤的增加能够提高预裂缝的隔振效果,却不利于保留岩体的稳定性。因此,实际工程中可通过增加侧向临空面的方式来减弱炮孔的夹制作用。如图 12 所示,先采用抽槽爆破的方式形成临空面;而后逐步向中隔墩位置扩挖,待扩挖至一定宽度后,再在中隔墩待开挖侧进行预裂爆破;最后采用常规梯段爆破技术将剩余岩体依次爆破完成。由于预裂孔引爆前主爆孔已开挖部分岩体,使得预裂孔所受夹制作用减弱,炸药爆炸能量更多地用于升船机侧岩体的损伤及破碎,进而保证了中隔墩岩体的稳定性。

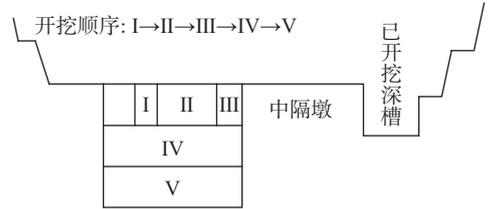


图 12 拉槽爆破开挖程序示意

Fig. 12 Illustration of excavation procedure of cutting blasting

增加侧向临空面一定程度上能够起到减振的效果,但预裂爆破中,如图 12 中的第 III 步爆破开挖,预裂孔爆破依然会对保留岩体产生较大的损伤,添加施工预裂缝则可减弱对保留岩体稳定性的影响。如图 13 所示,在预裂孔后方增设 1 排光爆孔,开挖过程中先起爆预裂孔形成预裂缝,再依次起爆不同段主爆孔,最后引爆靠近保留岩体的光爆孔。由于光爆孔爆破移除了预裂孔附近损伤较为严重的岩体,故相比于常规的预裂爆破开挖,采用施工预裂的方式能减轻对保留岩体的损伤。此外,以上数值模拟结果(图 8)显示,随着主爆孔的依次起爆,预裂缝附近岩体的损伤范围逐渐增加,隔振效果随之增强,故在实际爆破中可适当减少第 1 段炮孔装药量,以减弱爆破开挖对保留岩体的影响。

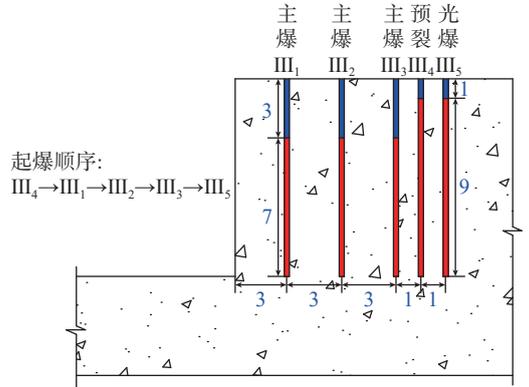


图 13 施工预裂爆破开挖程序示意(单位: m)

Fig. 13 Illustration of excavation procedure of construction presplitting blasting (unit: m)

3 结 语

依托三峡船闸爆破开挖试验,对比了预裂缝对不同段主爆孔爆破诱发振动的隔振效果,并借助数值模拟研究了主爆孔爆破累积损伤特性,分析了不同损伤范围下预裂缝的隔振比例,主要结论如下:

- (1) 预裂爆破中主爆孔爆破会对预裂缝附近岩体产生损伤,增加预裂缝对后续炮孔爆破产生应力波的隔振效果,实际开挖中可适当减小第一段主爆孔的单响药量,以降低爆破开挖对保留岩体的影响。
- (2) 随着预裂缝附近岩体损伤范围的增加,隔振效果逐渐增强,并最终稳定在 50% 左右。且当岩体损伤范围大于 4 cm 时,振动峰值的衰减幅度逐渐放缓。
- (3) 大型船闸开挖可通过拉槽爆破增加侧向临空面,以减小预裂爆破本身的损伤。可通过设置施工预裂缝的方式来化解累积损伤与预裂隔振需求之间的矛盾,进而保障对中隔墩的爆破安全控制。

参 考 文 献:

[1] 牛志国,王新. 船闸水工建筑物设计与工程实践[M]. 南京: 东南大学出版社, 2019. (NIU Zhiguo, WANG Xin. Design and

- engineering practice of hydraulic structures for ship lock[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 王彪, 王晓刚, 安建峰, 等. 船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟[J]. *水利水电工程学报*, 2021(4): 92-98. (WANG Biao, WANG Xiaogang, AN Jianfeng, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(4): 92-98. (in Chinese))
- [3] 吴波, 李文轩, 傅陆志丹, 等. 双线互输水船闸剩余水头优化研究[J]. *水利水电工程学报*, 2018(4): 61-67. (WU Bo, LI Wenxuan, FU Luzhidan, et al. Optimization study of residual head of mutual water filling and emptying double-line lock[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(4): 61-67. (in Chinese))
- [4] 张乐, 卢文波, 周俊汝, 等. 爆破冲击荷载作用下中隔墩岩体的动力响应与局部破坏机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊2): 520-527. (ZHANG Le, LU Wenbo, ZHOU Junru, et al. Dynamic response and local failure mechanism of division pier under blasting impact load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Suppl2): 520-527. (in Chinese))
- [5] 杨建华, 代金豪, 姚池, 等. 岩石高边坡爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 968-975. (YANG Jianhua, DAI Jinhao, YAO Chi, et al. Weakening laws of rock mass properties in blasting excavation damage zone of high rock slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 968-975. (in Chinese))
- [6] 卢文波, 李海波, 陈明, 等. 水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1513-1520. (LU Wenbo, LI Haibo, CHEN Ming, et al. Safety criteria of blasting vibration in hydropower engineering and several key problems in their application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1513-1520. (in Chinese))
- [7] 卢文波, 赖世骧, 董振华. 岩石钻爆开挖中预裂缝的隔震效果分析[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(3): 193-198. (LU Wenbo, LAI Shixiang, DONG Zhenhua. Analysis of vibration isolating effect of pre-splitting crack in rock excavation by blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(3): 193-198. (in Chinese))
- [8] 周春华, 龙源, 晏俊伟, 等. 基于WTMM的爆破振动信号奇异性分析[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(1): 108-111,164. (ZHOU Chunhua, LONG Yuan, YAN Junwei, et al. Singularity analysis of blasting vibration signals based on WTMM[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(1): 108-111,164. (in Chinese))
- [9] 王利军, 何忠明, 蔡军. 减震沟参数对地铁隧道爆破减震效果的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(3): 747-755. (WANG Lijun, HE Zhongming, CAI Jun. Analysis of effect of damping ditch parameters on blasting vibration reduction effect of metro tunnel[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 747-755. (in Chinese))
- [10] 褚怀保, 叶红宇, 杨小林, 等. 基于损伤累积的爆破振动传播规律试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(2): 173-177. (CHU Huaibao, YE Hongyu, YANG Xiaolin, et al. Experiments on propagation of blasting vibration based on damage accumulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 173-177. (in Chinese))
- [11] 杨小林, 朱思源, 褚怀保, 等. 基于损伤累积的大跨度隧道(洞库)爆破振动传播规律[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(10): 3958-3963. (YANG Xiaolin, ZHU Siyuan, CHU Huaibao, et al. Blasting vibration propagation of long-span tunnel (adit) based on damage accumulation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(10): 3958-3963. (in Chinese))
- [12] 胡英国, 卢文波, 陈明, 等. 不同开挖方式下岩石高边坡损伤演化过程比较[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1176-1184. (HU Yingguo, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Comparison of damage evolution process of high rock slope excavated by different methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1176-1184. (in Chinese))
- [13] SANCHIDRIÁN J A, SEGARRA P, LÓPEZ L M. Energy components in rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 130-147.
- [14] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 170-182. (GAO Qidong, LU Wenbo, YANG Zhaowei, et al. Components and attenuation of seismic waves induced by horizontal smooth blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 170-182. (in Chinese))
- [15] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 垂直孔爆破诱发地震波的成分构成及演化规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(1): 18-27. (GAO Qidong, LU Wenbo, YANG Zhaowei, et al. Components and evolution laws of seismic waves induced by vertical-hole blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(1): 18-27. (in Chinese))

Analysis of damage accumulating characteristics and vibration isolating effect of presplitting blasting in excavation of large-scale navigation lock

HU Haoran^{1,2}, ZHOU Haixiao³, ZHANG Yuzhu^{1,2}, LI Dongdong^{1,2}, ZHANG Chen³

(1. *Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China*; 2. *CISPDR Corporation, Wuhan 430010, China*; 3. *School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

Abstract: Controlling the blast-induced damage is of significance for the stability of division pier in the excavation of the large-scale navigation lock. Based on the on-site experiment, the peak particle velocities (PPV) induced by production boreholes were compared, and the damage evolution characteristics were analyzed with the help of the software LS-DYNA. Moreover, through the analysis of the on-site experiment results and numerical results, the blasting excavation scheme of the large-scale navigation lock was optimized. The research results indicate that the rock mass damage induced by production blast-holes will strength the pre-crack vibration isolating effect. With the increase of the width of the blast-induced damage zone, the vibration isolating effect is gradually increased, and finally stabilized at 50%. The attenuation rate of PPV increases with the width of blast-induced damage zone, and when the width of the damage zone reaches 4 cm, the attenuation rate gradually slows down. The damage cumulative characteristics induced by production and pre-splitting crack vibration isolation effect should be taken into consideration in the excavation of the large-scale navigation lock. Therefore, the optimizations of blasting excavation, including the cutting blasting and construction presplitting blasting, were put forward to reduce the blast-induced damage to reserved rock mass and optimize the blasting effect.

Key words: large-scale navigation lock; presplitting blasting; accumulating damage; vibration isolating effect; optimization of blasting excavation