

大型地下厂房开挖爆破振动动力响应数值模拟

姚强^{1,2}, 杨兴国^{1,2}, 陈兴泽^{2,3}, 李洪涛^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 3. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041)

摘要: 针对向家坝水电站主厂房爆破施工诱发振动效应对围岩稳定及相关结构安全性影响, 通过动力有限元数值模拟, 研究地下厂房在开挖爆破振动荷载作用下动力响应。结果表明, 顶拱拱脚处质点振速及拉应力最大, 拱脚以上质点振速及最大拉应力迅速衰减; 岩锚梁黏结面底部或顶部拉应力最大, 与水平向质点振速相关性较好; 高边墙质点振速与最大拉应力随高差增加而减小。综合分析数值计算结果与大量爆破振动实测数据, 建议围岩及混凝土龄期大于 28d 的岩锚梁安全质点振速分别取 15 cm/s 及 10 cm/s, 且有一定安全储备。

关键词: 地下厂房; ANSYS/LS-DYNA; 爆破振动; 数值模拟

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A

Numerical simulation of dynamic response of large underground powerhouse subjected to blasting vibration

YAO Qiang^{1,2}, YANG Xing-guo^{1,2}, CHEN Xing-ze^{2,3}, LI Hong-tao^{1,2}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

3. Guodian Dadu River Hydropower Development Co., Ltd. 610041, China)

Abstract: Aiming at the safety of the main powerhouse in the Xiangjiaba Hydropower Station, the blasting vibration response of the rock masses of the powerhouse during excavation process was simulated by using the dynamical finite element method (FEM). The simulation results show that, the vibration velocity and tensile stress at the feet of top arch are very large, and rapidly decrease with the increase of height. The tensile stress at the bottom or top of rock anchor beam is also large, and has a close correlation with the horizontal vibration velocity. The vibration velocity and tensile stress at the sidewall decrease with the increase of height difference. Comprehensively analysing the simulated results and field monitoring data, the safe vibration velocity levels were suggested to be 15cm/s and 10cm/s respectively for surrounding rock mass and anchor concrete.

Key words: underground powerhouse; ANSYS/LS-DYNA; blasting vibration; numerical simulation

我国水电资源大多分布于西部深山峡谷中, 位于该地区的水电工程, 采用地下厂房形式有利于枢纽布置与拦河大坝快速施工。作为大型地下洞室工程, 地下厂房不仅跨度大、边墙高, 且结构复杂, 对施工质量要求较高, 目前普遍采用钻爆法施工。钻爆法在完成厂房开挖的同时, 诱发的爆破振动效应会引起保留围岩力学性质劣化, 过大爆破振动亦会导致地下厂房岩锚梁混凝土开裂、混凝土与岩石间粘结力损失等^[1], 甚

至导致围岩局部坍塌及失稳, 安全事故时有发生。

钻爆法开挖诱发的地震波对地下厂房结构稳定影响较大。王玉杰等^[2]回归分析过周宁水电站地下厂房爆破地震波的衰减规律; 严鹏等^[3]通过分析爆破过程中开挖边界初始地应力动态卸载过程研究初始地应力场对围岩振动影响; 陈明等^[4]利用数值模拟研究爆破振动荷载作用的地下厂房岩锚梁动态响应特性; 蒋耀港等^[5-6]对拆除爆破引起的塌落振动及城市复杂环境下爆破振动危害效应进行理论及监测研究。但目前针对复杂条件下大型地下厂房爆破振动荷载作用的空间动力响应研究并不多见, 对爆破地震波在厂房中的传播规律、危害大小及控制标准等还尚无明确认识, 需进一步研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009104); 四川省科技支撑计划(2008SZ0232)

收稿日期: 2012-12-07 修改稿收到日期: 2013-05-03

第一作者 姚强 男, 博士生, 1987年生

通讯作者 李洪涛 男, 博士, 副教授, 1979年生

向家坝水电站主厂房跨度 31.4 m, 高 88.2 m, 规模属世界前列, 且工程地质条件复杂, 被多条断层及软弱夹层影响, 节理裂隙发育, 而开挖过程中稳定性为控制工程安全的重要因素。本文借助动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟, 研究该厂房在爆破振动荷载作用下动力响应, 分析顶拱、岩锚梁及高边墙等重点部位爆破振动衰减规律与应力分布, 获得爆破振动荷载作用下易发生破坏、施工中应重点监测及保护部位。在综合分析数值计算结果与大量爆破振动监测数据基础上, 给出的建议采用爆破振动安全控制标准, 可为类似工程提供参考。

1 爆破荷载施加方法

爆破荷载数值模拟主要有 3 种方法: ①直接模拟法, 用有限元程序中炸药材料及状态方程控制炸药的爆轰过程; ②确定作用于炮孔壁的爆轰压力峰值及时程曲线, 并将该半理论半经验爆破荷载时程曲线施加于炮孔壁; ③建模时不考虑炮孔形状, 对爆破荷载按一定方法等效, 将等效后爆破荷载时程曲线施加于同排炮孔连线, 作用范围与炮孔内装药段长度相等^[7]。直接模拟法适用于模拟近区冲击响应, 后两种方法则适用于中远区爆破振动数值模拟。由于炮孔尺寸远小于工程岩体尺寸, 因用前两种方法建模时需体现出炮孔, 给模型建立及网格划分造成困难, 计算量巨大, 为省去繁杂的网格划分, 本文采用施加等效荷载方法。该方法关键在于确定爆破荷载模型、爆破荷载峰值及作用时间, 对其等效后施加于模型。目前工程中常用爆破荷载衰减模型主要有三角形分布模型与半理论半经验指数函数分布模型。本文采用三角形荷载模型, 使用时需确定爆破荷载峰值 P_0 , 爆破荷载升压时间 t_1 及正压作用时间 t_2 。

确定爆破荷载峰值 P_0 , 据凝聚炸药爆轰波 $C-J$ 理论, 对耦合装药, 炮孔初始平均爆轰压力 P_0 为波阵面后最大压力的一半:

$$P_0 = \frac{\rho_c D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (1)$$

式中: P_0 为炸药爆轰平均初始压力; ρ_c 为炸药密度; D 为爆轰速度; γ 为炸药等熵指数, 取 $\gamma = 3$ 。

对不耦合装药条件, 装药不耦合系数较小时, 爆生气体膨胀只经过 $P > P_k$ 状态, 炮孔初始平均压力 P_0 计算式为:

$$P_0 = \frac{\rho_c D^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \quad (2)$$

装药不耦合系数较大时, 爆生气体膨胀需经历 $P \geq P_k$ 及 $P < P_k$ 等两个阶段, P_k 为气体临界压力。式(2)变为:

$$P_0 = \left(\frac{\rho_c D^2}{2(\gamma + 1)} \right)^{\frac{\nu}{\gamma}} P^{\frac{\gamma - \nu}{\gamma}} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\nu} \quad (3)$$

式中: P_0 为不耦合装药时爆破荷载峰值压力; ν 为膨胀绝热指数, $\nu = 1.2$; d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径。本工程中用 2# 岩石硝铵炸药, 密度 $1\,000\text{ kg/m}^3$; 爆轰波速 $3\,600\text{ m/s}$; 气体临界压力 $P_k = 200\text{ MPa}$ 。

荷载等效施加方法见图 1, 设单个炮孔壁上作用压力 P_0 , 炮孔半径 r_0 , 孔间距 a , 考虑力、力矩的平衡, 将作用于炮孔壁压力 (图 1(a)) 等效施加于炮孔连心线 (图 2(b)), 施加等效压力值算式为:

$$P_e = (2r_0/a)P_0 \quad (4)$$

据研究成果^[1,7-10], 本文取正压作用时间 $t_2 = 400\text{ }\mu\text{s}$, 升压时间 $t_1 = 100\text{ }\mu\text{s}$, 爆破荷载过程曲线见图 2。

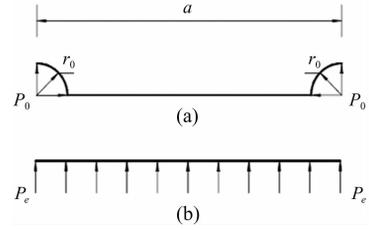


图 1 爆破荷载等效施加方法
Fig. 1 The equivalent approach for the acting of blasting load

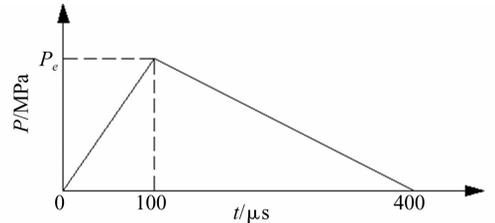


图 2 爆破等效动荷载时程三角形分布
Fig. 2 The time history of equivalent dynamic load with triangle distribution

2 数值模拟参数

材料采用理想弹塑性模型, 据 Cowper-Symonds 方程考虑应变率效应, 即:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\xi}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \xi_p^{\text{eff}}) \quad (5)$$

式中: σ_y 为考虑应变率效应的屈服强度; σ_0 为静态屈服强度; $\dot{\xi}$ 为应变率; C, P 均为 Cowper-Symonds 应变率参数; ξ_p^{eff} 为有效塑形应变; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量, 计算式为:

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}} \quad (6)$$

式中: E 为材料弹性模量; E_{tan} 为切线模量。

数值模拟材料参数见表 1。岩石动强度一般为静强度的 1.2 ~ 5 倍, 在冲击荷载作用下, 软岩动抗压强度及动弹性模量甚至高于静载近 10 倍^[11]。故在爆破振动荷载作用下须考虑材料动强度与静强度差别, 本文设围岩及混凝土动抗拉强度均提高 2 倍, 即 5 MPa, 3 MPa。

表1 材料参数

Tab.1 Parameters of materials

材料	E/GPa	μ	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	σ_0/MPa	ε_v	E_{tan}/GPa	β	C	P
围岩	18	0.22	2550	100	0.030	0	1	40	3
混凝土	25	0.167	2400	30	0.002	0	1	40	3

3 计算方案及模型

3.1 计算方案

向家坝水电站主厂房分区层开挖。第 I 层开挖高度 11.2 m, 开挖程序为中部导洞开挖、上游侧扩挖及下游侧扩挖。第 II 层开挖高度 7 m, 开挖程序为中部拉槽及两侧保护层开挖。第 III 层为岩锚梁所在分层, 高 9 m, 开挖程序为中部拉槽、两侧保护层及岩台开挖。第 IV ~ VII 层层高分别为 8.5 m、10.5 m、9 m、8 m, 均用先两侧边墙预裂、中部拉槽跟进、深孔梯段爆破的开挖方式。主厂房第 VIII、IX 层开挖层高 11.5 m、13.38 m, 均分三小层开挖。据地下厂房开挖程序, 厂房第 II 层紧接顶拱层开挖, 且开挖爆破规模大, 引起顶拱层爆破振动响应最大; 刚浇注成型的岩锚梁对第 IV 层爆破开挖诱发的振动响应最大, 岩锚梁局部断面见图 3。第 VII 层爆破开挖时高边墙已形成, 且第 VII 层爆破规模较下两层大, 高边墙对第 VII 层爆破振动响应最大。故分别建立第 II 层、第 IV 层、第 VII 层计算模型, 分析顶拱、岩锚梁、高边墙的爆破振动响应。

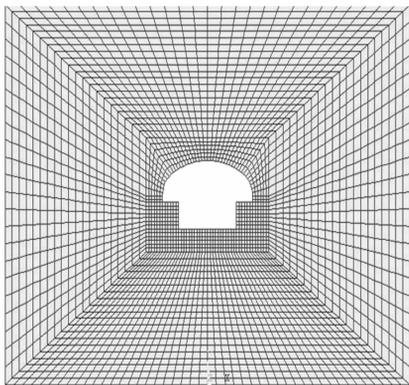


图4 第II层计算模型

Fig. 4 Calculation model for layer II

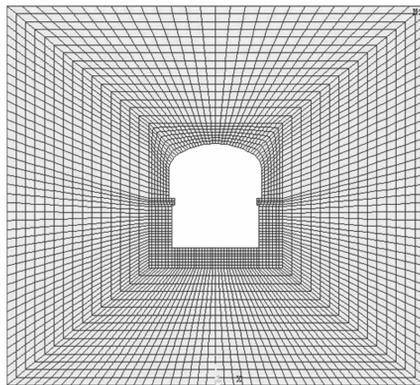


图5 第IV层计算模型

Fig. 5 Calculation model for layer IV

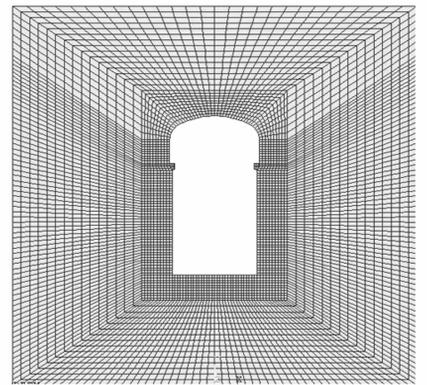


图6 第VII层计算模型

Fig. 6 Calculation model for layer VII

破时对岩锚梁影响大, 故对预裂爆破进行数值模拟。预裂爆破孔径 80 mm, 药径 25 mm, 孔深 9.0 m, 孔距 0.7 m, 堵塞长度 0.7 m。装药不耦合系数较大, 据式 (3) 得爆破荷载峰值 $P_m = 180.6 MPa$, 据式 (4) 得等效荷载 $P_e = 20.6 MPa$ 。

第 VII 层计算模型高宽均 150 m, 四周用无反射边界, 见图 6。开挖情况与第 IV 层相似, 亦对预裂爆破进行模拟。预裂爆破孔径 80 mm, 药径 32 mm, 孔深 10.5

m, 孔距 0.7 m, 堵塞长度 0.7 m。装药不耦合系数较大, 据式 (3) 计算爆破荷载峰值压力为 $P_m = 326.7 MPa$, 据式 (4) 计算等效荷载 $P_e = 37.3 MPa$ 。

4 数值计算结果

模拟第 II 层中部拉槽爆破时, 从顶拱拱脚向上至拱顶依次选编号 0 ~ 11 共 12 节点, 各质点峰值振速见图 7。由图 7 看出, 顶拱拱脚处水平向及竖直向质点峰

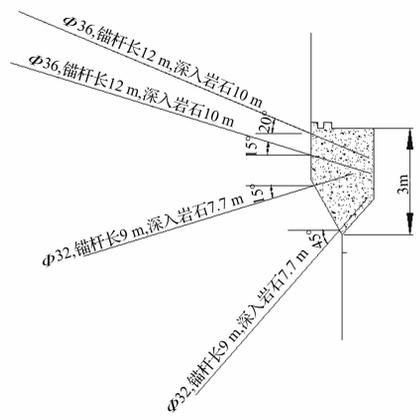


图3 向家坝地下厂房岩锚梁结构断面图

Fig. 3 Sectional view of rock anchor

beam of Xiangjiaba Hydropower Station

3.2 计算模型

第 II 层计算模型宽 150 m, 高 100 m, 四周用无反射边界, 见图 4。第 II 层开挖时中部拉槽梯段爆破孔深、孔径、最大单响药量及爆破规模均最大, 故对梯段爆破进行数值模拟。梯段爆破炮孔径 76 mm, 药径 60 mm, 孔深 7.6 m, 孔距 1.95 m, 堵塞长度 1.0 m。因装药不耦合系数较小, 按式 (2) 计算爆破荷载峰值压力 $P_0 = 392.2 MPa$, 据式 (4) 得等效荷载 $P_e = 15.3 MPa$ 。

第 IV 层计算模型宽 150 m, 高 130 m, 四周用无反射边界, 见图 5。开挖时预裂爆破靠近保留边墙及岩锚梁, 且孔深、最大单响药量及受岩石夹制作用较大, 爆

值振速最大,为 8.5 cm/s,8.1 cm/s,质点峰值振速沿拱脚向上迅速衰减,拱顶质点振速最小。

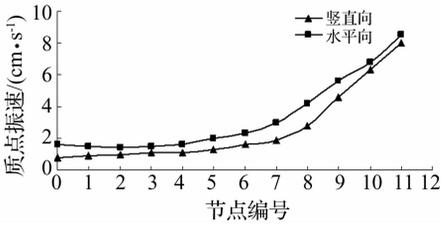


图 7 顶拱各点峰值质点振速

Fig. 7 Peak particle velocity along the arch surface

混凝土与岩石抗压强度远大于抗拉强度,抗剪强度亦高于抗拉强度,故按极限拉应力准则判断围岩及岩锚梁破坏。顶拱围岩最大拉应力计算结果见图 8。由图 8 看出,拱脚处拉应力最大为 1.26 MPa,由拱脚至拱顶拉应力迅速衰减,与质点峰值振速变化规律相似。第 II 层中部拉槽爆破引起围岩最大拉应力小于岩石动抗拉强度,不会造成围岩破坏。

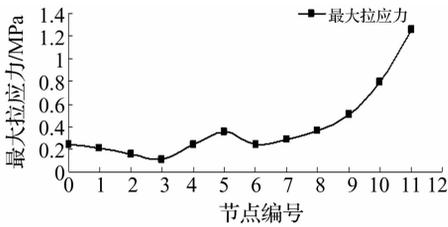


图 8 顶拱各点最大拉应力

Fig. 8 Maximum tensile stress along the arch surface

岩锚梁与岩石胶结体强度最薄弱处为黏结面,因其强度较低,较易发生破坏。故应重点关注黏结面响应。模拟厂房第 IV 层预裂爆破时,由岩锚梁黏结面底部向上取 1~5 编号 5 个节点,各点质点峰值振速与应力计算结果见表 2。由表 2 看出,竖直向质点峰值振速在黏结面底部最大,为 11.34 cm/s,向上快速衰减。水平向质点峰值振速在黏结面底部最大,为 10.73 cm/s,向上先减小后增大,变化较复杂。岩锚梁黏结面最大压应力与最大拉应力水平相当,而最大剪应力则小很多。黏结面顶部或底部拉应力均可能最大,为 0.7921 MPa,而混凝土与岩石黏结面抗拉强度试验值大于 1.0 MPa,故黏结面是安全的。黏结面最大拉应力与水平向质点振速分布规律相似,黏结面破坏受水平向控制,安全质点振速受水平向质点振速控制。

将黏结面底部节点 1 与边墙上节点 6 质点振速时程曲线进行比较,见图 9、图 10。由两图看出,点 1 水平向质点振速时程曲线较点 6 复杂,竖直方向相似。其原因由于岩锚梁黏结面为混凝土与岩石两种材料交界处结构体型复杂,导致应力波在传播过程中发生折射

与反射,使黏结面质点振速曲线复杂化。

表 2 爆破振动作用下岩锚梁动力响应计算结果

Tab. 2 Results of dynamic response of rock anchor beam under blasting vibration

编号	质点峰值振速/ (cm · s ⁻¹)		最大压应 力/MPa	最大剪应 力/MPa	最大拉应 力/MPa
	水平向	竖直向			
1	10.73	11.34	0.955 8	0.477 9	0.792 1
2	8.66	10.30	0.880 6	0.440 3	0.785 8
3	6.62	8.24	0.614 3	0.367 4	0.402 9
4	7.76	8.03	0.562 7	0.320 3	0.640 5
5	8.50	6.82	0.687 1	0.388 4	0.776 8

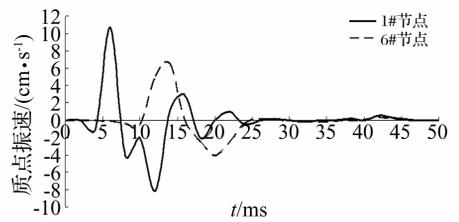


图 9 水平向质点振速时程曲线

Fig. 9 Time history curve of level particle vibration velocity

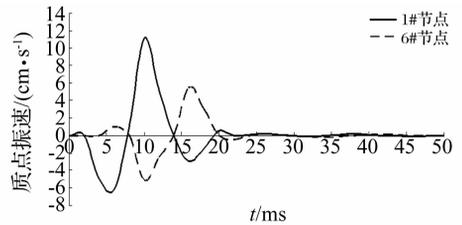


图 10 竖直向质点振速时程曲线

Fig. 10 Time history curve of vertical particle vibration velocity

Fig. 10 Time history curve of vertical particle vibration velocity

模拟第 VII 层爆破开挖计算的边墙各点峰值振速及最大拉应力随高差变化曲线见图 11。由图 11 看出,各方向质点峰值振速随高程增加而减小。距爆源 15 m 高差范围内,各方向质点峰值振速数值大小与衰减规律相似,且衰减较快。超过 15 m 后,竖直向振速衰减幅度明显大于水平向,各点振速小于水平向。由于岩锚梁的存在,水平向振速出现反射与折射,距爆源高差 35 m 处岩锚梁区域水平向质点峰值振速出现波动,影响范围局限于岩锚梁附近。

在水电工程施工过程中,评价爆破振动危害效应为控制距爆源 10 m 处质点峰值振速。距离爆源 10 m 高差处计算边墙水平向质点峰值振速为 11.24 cm/s,竖直向为 11.63 cm/s。边墙最大拉应力随高程增加而减小,变化较均匀。最大拉应力距爆源 10 m 高差处为 1.75 MPa,小于岩石动抗拉强度,围岩不会发生破坏。在岩锚梁影响区内的最大拉应力出现波动,与水平向

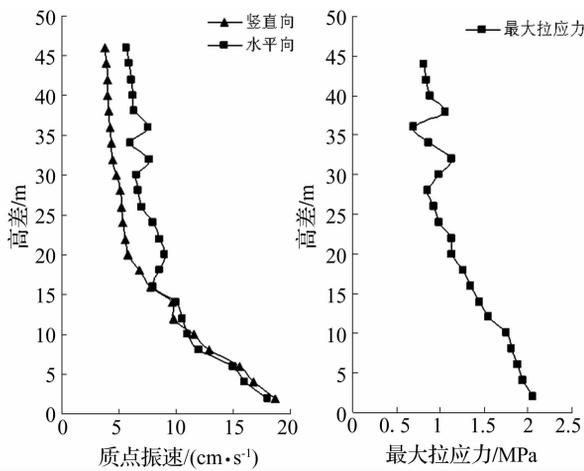


图11 质点峰值振速及最大拉应力随高程变化曲线

Fig. 11 Time history curve of particle vibration velocity and maximum tensile stress

质点峰值振速相关性较好。据数值计算结果,各部位安全质点振速计算式为:

$$V_s = \frac{\sigma_d}{\sigma} \nu \quad (7)$$

式中: σ_d 为动抗拉强度; σ 为最大拉应力; ν 为质点峰值振速。据式(7)得拱脚、岩锚梁黏结面及距爆源10 m 高处边墙的安全质点振速分别为33.7 cm/s、13.55 cm/s、32.1 cm/s。考虑2倍安全系数,得安全质点振速分别为16.8 cm/s、6.8 cm/s、16.0 cm/s。据计算结果,岩锚梁及围岩安全质点振速可分别取不大于7.0 cm/s及16.0 cm/s。

爆破安全规程(GB6722-2003)中规定水工隧道的爆破振动安全允许标准为7~15 cm/s,7~28 d龄期混凝土为7.0~12 cm/s。向家坝水电站工程招标文件则要求围岩及7~28 d龄期混凝土安全质点振速分别为10 cm/s及5.0~7.0 cm/s。本文对向家坝水电站地下厂房开挖过程进行大量爆破振动监测,围岩及岩锚梁部位实测质点峰值振速结果见表3。由表3看出,围岩实测质点振速有多个场次达到10~15 cm/s,甚至达到15~20 cm/s;岩锚梁处实测质点振速有多个场次达到10~15 cm/s,均只有约50%监测数据满足工程招标文件要求。据爆破施工后现场调查,即使爆破振动出现多次超标,围岩及岩锚梁混凝土亦未发生明显破坏,在一定程度上说明工程招标文件对爆破振动控制规定偏严格。

由于岩锚梁并非每点均达最大质点振速及最大拉应力,且岩锚梁黏结面抗拉强度取静态强度较小值1.0 MPa,未考虑动态条件材料强度的提高。而本文数值模拟时采用过假定,计算模型亦有简化,综合分析计算结果与现场监测,参考《爆破安全规程》规定,建议围岩及混凝土龄期超过28 d的岩锚梁安全质点振速分别为不

大于15.0 cm/s,10.0 cm/s。据本文建议的控制标准控制爆破振动,表3中监测数据约80%均符合要求,且实际不会对厂房结构造成破坏,可为类似工程提供参考。

表3 围岩、岩锚梁实测最大振速统计
Fig. 3 Measured maximum vibration velocity statistics of surrounding rock and anchor beam

监测部位	振速范围/(cm·s ⁻¹)	场次	百分比/%
围岩	< 10	26	52.0
	10 ~ 15	15	30.0
	15 ~ 20	9	18.0
岩锚梁混凝土	< 10	17	73.9
	10 ~ 15	6	26.1
	> 15	0	0.0

5 结论

通过数值模拟、现场监测,分析向家坝水电站地下厂房开挖中爆破振动响应特性,结论如下:

(1)在地下厂房开挖爆破振动荷载作用下,顶拱拱脚处质点振速及拉应力最大,岩锚梁黏结面顶部或底部拉应力最大,黏结面安全受水平向质点峰值振速控制。水平向应力波在岩锚梁黏结面发生反射、折射等现象。

(2)由于实测的围岩、岩锚梁质点峰值振速分别达15~20 cm/s与10~15 cm/s而未产生破坏现象,故综合数值计算、爆破振动监测结果,建议围岩、混凝土龄期超过28天的岩锚梁安全质点振速分别取不大于15.0 cm/s与10.0 cm/s,且有一定安全储备。

(3)爆破振动频率、地下厂房大小、围岩性质及埋深等因素不同,爆破施工诱发的振动对地下厂房影响大小不同,爆破振动控制标准亦不同,需分别研究。

参考文献

- [1] 张文焯. 大型地下厂房开挖爆破振动破坏特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
- [2] 王玉杰,梁开水,田新邦. 周宁水电站地下厂房开挖爆破地震波衰减规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(20):4111-4114.
WANG Yu-jie, LIANG Kai-shui, TIAN Xin-bang. Study on redundant regulation of underground digging blasting vibration of zhouning hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(20):4111-4114.
- [3] 严鹏,卢文波,陈明. 初始地应力场对钻爆开挖过程中围岩振动的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5):1036-1044.
YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming. Study on impact of initial geostress field on vibration of surrounding rock during excavation with drilling and blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5):1036-1044.

- 37(5); 50-53.
- [7] 张戎社, 杜彦良, 孙宝臣, 等. 光纤光栅压力传感器在斜拉索索力监测中的应用研究[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 47-49.
ZHANG Xu-she, DU Yan-liang, SUN Bao-chen, et al. Application of optical fiber grating pressure sensor on monitoring of cables tension [J]. Journal of The China Railway Society, 2002, 24(6): 47-49.
- [8] Yoji O, Tadahito M, Shigeki Y, et al. Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(7-8): 951-958.
- [9] Kara P, Philip P, John B, et al. Experimental verification of response of embedded optical fiber bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 33(2): 107-119.
- [10] Prost A, Peters K, Zikry M A, et al. Assessment of damage in composite laminates through dynamic full-spectral interrogation of fiber Bragg grating sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(1): 1-11.
- [11] 刘云, 简水生, 裴丽, 等. 基于光纤光栅传感的新型磁悬浮列车定位方法的研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(5): 72-76.
LIU Yun, JIAN Shui-sheng, PEI Li, et al. Research on the novel maglev train locating method based on fiber grating pressure sensor [J]. Journal of The China Railway Society, 2005, 27(5): 72-76.
- [12] Massimo L F, Pedro C G, Alberto R, et al. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 85-92.
- [13] 李维来, 潘建军, 范典. 光纤光栅列车计轴系统的数据采集与处理[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 13-15.
LI Wei-lai, PAN Jian-jun, FAN Dian. Data acquisition and processing for fiber grating train axle counting system [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 13-15.
- [14] 黄红梅, 袁慎芳. 基于FBG光谱特性的修补结构中裂纹扩展的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(10): 1290-1293.
HUANG Hong-mei, YUAN Shen-fang. Monitoring of crack propagation in repaired structure using FBG sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(10): 1290-1293.
- [15] 黄红梅, 袁慎芳. 基于光纤Bragg光栅传感器的疲劳裂纹扩展的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(4): 447-450.
HUANG Hong-mei, YUAN Shen-fang. Research on the fatigue crack propagation using fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2009, 20(4): 447-450.
- [16] 赵国锋, 闫连山, 王平, 等. FBG反射谱展宽效应在轨道传感器中的应用研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(12): 1755-1757.
ZHAO Guo-feng, YAN Lian-shan, WANG Ping, et al. Application of FBG reflective spectrum broadening effect for rail sensors [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(12): 1755-1757.
- [17] Othonos A. Fiber bragg gratings [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [18] Huang S, Ohn M M, LeBlanc M, et al. Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings [J]. Smart Materials and Structures, 1998, 7(2): 248-256.

(上接第70页)

- [4] 陈明, 卢文波, 易长平. 大型地下厂房岩锚梁爆破安全控制标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 499-504.
CHEN Ming, LU Wen-bo, YI Chang-ping. Research on safety standard for rock anchor beam under blasting vibration in large underground powerhouse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 499-504.
- [5] 蒋耀港, 沈兆武, 龚志刚. 构筑物爆破拆除振动规律的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 36-41.
JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, GONG Zhi-gang. Vibration law of structure blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(5): 36-41.
- [6] 蒋耀港, 沈兆武, 杨昌德. 市内复杂环境下大药量爆破降振及振动监测分析的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 156-161.
JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, YANG Chang-de. Big charge blasting vibration damping and vibration monitoring analysis under intracity complicated environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 156-161.
- [7] 许红涛. 岩石高边坡爆破动力稳定性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006.
- [8] 卢文波, 陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 140-147.
LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. Theoretical analysis of the pressure variation in borehole for pre-splitting explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 140-147.
- [9] 黄玉锋, 舒大强, 陈维炎. 爆破震动作用下地下洞室支护结构的动态响应分析[J]. 爆破, 2006, 23(1): 14-18.
HUANG Yu-feng, SHU Da-qiang, CHEN Wei-yan. Effect of blasting vibration on the support structure of an underground chamber [J]. Blasting, 2006, 23(1): 14-18.
- [10] 张建华, 李世禄, 王玉杰. 爆炸扩腔数值模拟及分析[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 174-177.
ZHANG Jian-hua, LI Shi-lu, WANG Yu-jie. Numerical simulation of springing blasting in stemmed hole [J]. Journal of Wuhan Uni. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2001, 24(2): 174-177.
- [11] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.