

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.011

水下钻孔爆破冲击波下桥墩的动态响应及防护分析^{*}

李 源^① 吴 立^① 彭亚雄^② 朱彬彬^① 谢达建^③

①中国地质大学(武汉)工程学院(湖北武汉,430074)

②湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室(湖南湘潭,411201)

③长江重庆航道工程局(重庆,400011)

[摘 要] 利用数值模拟方法以及现场监测技术,结合砖灶子水下炸礁项目,研究了水下钻孔爆破水中冲击波对桥墩的影响以及防护,对水中冲击波作用下桥墩结构的动态响应以及气泡帷幕的削减效果进行对比分析,并结合现场监测数据,对李家沱大桥的动态响应以及安全状态做出评价。研究发现:桥墩结构对水中冲击波的动态响应在桥墩中部及桥趾部位较大,且迎爆面的响应大于背爆面,测量点的速度与加速度响应最大值均出现在水平径向,然后是垂直方向和水平切向;气泡帷幕对于水中冲击波的削减效果良好,且距离保护对象5 m时效果最佳。运用气泡帷幕防护及现场监测指导施工,使得李家沱大桥处于安全状态下。

[关键词] 水下钻孔爆破;水中冲击波;动态响应;气泡帷幕;防护

[分类号] TV542+.5

Dynamic Response and Protective Analysis of Bridge Pier to Shock Wave in Underwater Drilling Blasting

LI Yuan^①, WU Li^①, PENG Yaxiong^②, ZHU Binbin^①, XIE Dajian^③

①Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Hubei Wuhan, 430074)

②Hu'nan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hu'nan University of Science and Technology (Hu'nan Xiangtan, 411201)

③Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau (Chongqing, 400011)

[ABSTRACT] Combining with underwater drilling blasting reef project in Zhuanzaози, numerical simulation methods and on-site monitoring techniques were used to study the influence of shock wave in underwater drilling blasting on piers and preventive measures. Dynamic response of pier structure to shock wave in water and reduction effects of bubble curtain have been analyzed in comparison. Combining with on-site monitoring data, dynamic response and safety status of Lijiatuo Bridge has been evaluated. Results show that, the dynamic response of the pier structure to shock waves in water is larger in the middle of the pier and at the toe, and the response of the explosive face is larger than the back face. The maximum velocity and acceleration response appear in the horizontal radial direction, then the vertical direction and the horizontal tangential direction. When the distance between bubble curtain and the protected object is 5m, the weakening effect could be the best. Bubble curtain protection and on-site monitoring were used to guide the construction, making the Lijiatuo Bridge in a safe state.

[KEYWORDS] underwater drilling blasting; shock wave in water; dynamic response; bubble curtain; protection

引言

目前,航道的建设与治理工程逐渐变得越来越迫切,水下钻孔爆破技术的发展为其提供了极大的

施工便利,并发挥了极其重要的作用^[1]。水中冲击波对周边环境的有害作用不可忽视,尤其是对爆破区域内桥梁等建筑的影响;对桥墩等建(构)筑物在水中冲击波作用下的动态响应及相关安全防护技术进行分析、研究具有重要意义^[2-3]。

* 收稿日期:2018-10-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41672260)

第一作者:李源(1991 -),男,硕士,主要从事水下爆炸理论及技术的研究。E-mail:cugliyuan@163.com

通信作者:吴立(1963 -),男,博导,教授,主要从事地下及爆破工程技术研究。E-mail:lwu@cug.edu.cn

水中冲击波的作用下水中建(构)筑物的动态响应是一个重要的研究方向。张鹏翔等^[4]通过USA方法研究了水中冲击波影响下混凝土构筑物的压力和加速度响应;Liu等^[5]运用修正DDA方法,研究了水中冲击波影响下的船舶响应,较为贴合试验结果;李裕春等^[6]通过模拟以及试验研究,分析了水中冲击波作用下混凝土墩的破坏和动态特性;彭亚雄^[7]运用理论分析、现场调研结合数值模拟等手段对水下钻孔爆破水击波和地震波协同作用下桥墩的响应进行了研究,获取到其响应特性及演化规律。水中冲击波防护方面,谢达建等^[8]针对不同条件下气泡帷幕对水中冲击波的削减进行分析,效果良好。综上研究的广度及深度虽然较高,但水下爆破的模拟和动态响应是一个极其复杂的过程,仍存在众多难题待解决。本文中,运用ANSYS LS-DYNA数值模拟技术及现场监测,结合实际工程,运用模拟手段研究水下钻孔爆破过程,及水下爆破水中冲击波动态传递过程,获悉水中冲击波对于桥墩的作用规律及动态响应,并对防护措施(气泡帷幕)的作用进行验证分析,为实际施工提供一定的指导作用^[9-10]。

1 水下钻孔爆破水中冲击波的削减

针对水中冲击波的传播影响特征,结合其产生-传播-作用的整个过程,削弱水中冲击波的措施可以分为爆源控制、传播控制等,主要包括爆破参数和装药结构的优化、起爆方式及炸药种类的合理选取、以及相关保护措施的设置等。

1.1 爆源控制

爆破参数以及装药结构的优化选取是控制水中冲击波有害效应的前提,对其进行分析研究有重大意义^[11]。2#岩石乳化炸药抗水性优异、密度大、爆速高、起爆敏感度好,选用其进行水下钻孔爆破施工,优点较多。水下钻孔爆破宜采用不耦合装药的形式,并采用较大的不耦合系数,选择两端同时起爆的方式,以达到对水中冲击波有害效应的严格控制。

1.2 传播控制

对于水中冲击波在传播过程中的控制,目前使用最广泛且有效的手段是在爆源与保护对象之间设置气泡帷幕。水中冲击波在传播至水与气泡的界面时,两种传播介质不同波阻抗的差异极大地削减了冲击波,且波阻抗的差距越大,削减效果越佳,这是传播过程削弱水中冲击波的关键所在^[12-14]。本项目工程实际施工中也运用气泡帷幕技术来对水击

波进行削减,以保证安全施工的进行。

2 水下钻孔爆破动态响应模拟分析

2.1 工程概况

长江上游九龙坡至朝天门河段处于变动回水区上段,由于泥沙上冲下淤、消落期泥沙冲刷不及时,航道通航条件不断恶化,疏浚工程势在必行,其中,水下钻孔爆破炸礁工程占到一定比例。砖灶子滩段位于航道里程675~678 km,主要因江中砖灶子礁石石盘碍航而得名,整个礁石位于河流中央,大桥主跨之下,南、北主桥墩到礁石的距离分别是228、166 m,水下钻孔爆破炸礁实施时,对李家沱大桥的保护是重点所在。

2.2 材料模型及参数选取

2.2.1 炸药的材料模型

材料模型采用Mat_High_Explosive_Burn模型,JWL状态方程如式(1):

$$p(V,E)=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}。$$

(1)

式中:JWL状态方程的参数为A、B、R₁、R₂和ω;炸药的内能用E表示;当前的相对体积用V表示。具体参数如表1所示。

表1 炸药的计算参数

Tab.1 Explosive parameters

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		爆速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		C-J压力/ GPa	
1.3		4 000		9.8	
A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E/GPa
214.4	0.182	4.15	0.95	0.15	4.192

2.2.2 气泡帷幕的材料模型

运用空气隔层等效代替的原理来替代气泡帷幕发挥作用,采用Mat_Null的材料模型,Eos_Linear Polynomial作为线性多项式状态方程,见式(2):

$$\begin{cases} p=C_0+C_1\mu+C_2\mu^2+C_3\mu^3+\\ \quad (C_4+C_5\mu+C_6\mu^2)E; \\ \mu=\frac{\rho}{\rho_0}-1。 \end{cases}$$

(2)

式中:材料密度和材料初始密度分别为ρ、ρ₀;材料的内能为E;状态方程参数为C₀、C₁、C₂、C₃、C₄、C₅、C₆,其数值分别为-1.0×10⁻⁶、0、0、0、0.4、0.4、0。

2.2.3 岩石材料模型

运用Mat_Plastic_Kinematic塑性动力学模型,

用 Cowper-Symonds 模型来研究,屈服应力 σ_y 与应变率 ε 关系如式(3):

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \left(\sigma_0 + \beta \frac{E_0 E_{tan}}{E_0 - E_{tan}} \varepsilon_p^e \right). \quad (3)$$

式中: ε 为加载应变率, s^{-1} ; σ_0 为岩体初始屈服应力, Pa; E_0 为杨氏模量, Pa; C 、 P 为 Cowper-Symonds 的应变率参数; β 为硬化参数, $0 \leq \beta \leq 1$; E_{tan} 表示切线模量, Pa; ε_p^e 为有效塑性应变。

岩石材料密度为 2.56 g/cm^3 ; 弹性模量为 34 GPa ; 泊松比为 0.183 ; 屈服应力为 40 MPa ; 切线模量为 4.3 GPa ; 硬化系数为 0.5 。

2.2.4 桥墩材料模型

桥墩属弹性变形, 变形幅度基本处于一定程度之内, 视为弹性体。模拟时, 材料模型选用 Mat_Elastic, 密度 2.65 g/cm^3 , 弹性模量 30 GPa , 泊松比 0.167 。

2.3 计算模型建立

结合现场实际施工状况, 建立 ANSYS 数值模拟计算模型。模型大小为 $29.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 19.0 \text{ m}$, 上层空气高度 2.0 m , 中层水域高度 10.0 m , 下层岩体高度 7.0 m 。模型选取 $\varnothing 100 \text{ mm}$ 的炮孔, 设置减震孔, 最大程度地削弱地震波影响, 炮孔以水介质为堵塞材料, 孔深 5.6 m , 装药高度 5.0 m 。使用 2#岩石乳化炸药, 单个炮孔总药量为 40 kg , 采用耦合装药。起爆位置为距孔底 3.1 m 高处。桥墩模型距离炮孔 20.0 m , 二者中间设置通过空气层简化的气泡帷幕模型。岩石和桥墩采用拉格朗日网格建模, 炸药、水、空气、气泡帷幕和堵塞物等材料采用欧拉网格建模, 单元使用多物质 ALE 算法, 桥墩、岩石与水、气泡帷幕间采用流固耦合方法, 基本模型示意图见图 1。建模时采用 $\text{cm-}\mu\text{s-g}$ 单位。

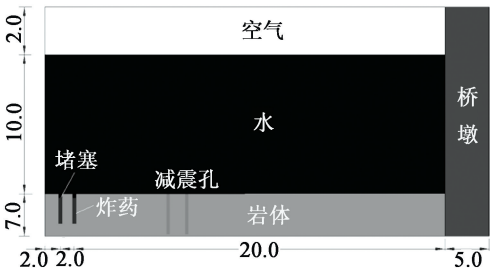


图 1 计算模型(单位:m)
Fig. 1 Calculation model (Unit: m)

2.4 无气泡帷幕工况动态响应分析

对不设置气泡帷幕时水下钻孔爆破的过程进行模拟分析, 选取如图 2 所示墩身上的 $A \sim F$ 不同测点, 分析水中冲击波动态传播以及桥墩的动态响应,

其不同时刻的压力云图见图 3。

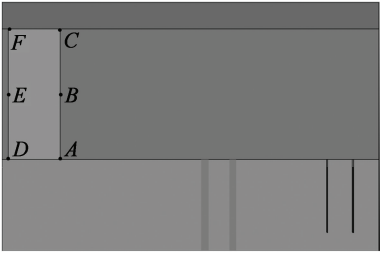


图 2 测点布置图
Fig. 2 Location of monitoring points

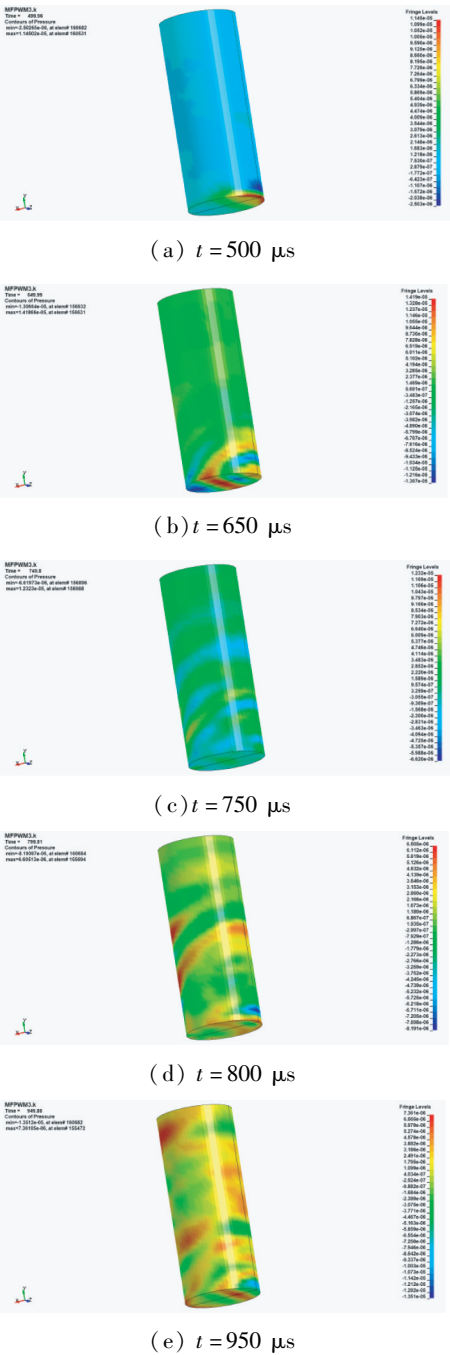


图 3 压力云图
Fig. 3 Contours of pressure

根据压力云图,当 $t=500\text{ }\mu\text{s}$ 时,迎爆面桥趾部位呈现出较大的压应力,并逐渐向周围扩散,在 $t=800\text{ }\mu\text{s}$ 及以后,水中冲击波开始直接作用于墩身,产生较大的压力,同时迎爆面桥趾部位呈现出拉应力,而背爆面桥趾部位呈现出压应力。获取对桥墩各个测点的动态响应参数如表2、表3所示,其中 X 、 Y 、 Z 分别为水平径向、垂直方向、水平切向。

表2 监测点的速度

Tab.2 Velocity at monitoring points

	cm/s					
方向	A	B	C	D	E	F
X	1.58	2.92	1.18	1.44	1.86	0.93
Y	1.56	1.93	0.65	0.95	1.52	1.32
Z	0.28	0.49	0.17	0.16	0.34	0.29

表3 监测点的加速度

Tab.3 Acceleration at monitoring points

	cm/s ²					
方向	A	B	C	D	E	F
X	2 720	4 380	3 250	2 350	3 220	2 560
Y	2 040	3 400	2 610	1 730	2 590	2 290
Z	1 290	1 640	1 380	790	1 270	860

可以看出,水中冲击波对于迎爆一侧而言是直接作用,致使各个测点的响应数值均大于背爆一侧,测点的速度与加速度最大值均出现在水平径向,然后是垂直方向和水平切向。炸药在水下爆炸时,临近的桥墩将受到水中冲击波作用,以沿水中冲击波传播方向增量最大,很好地证明了水平径向响应最大这一特点。

通过研究对比,桥墩在迎爆面与背爆面的动态响应在各个方向上以桥趾和中部各点表现较大,各个测点的有效应力时程曲线如图4所示,可以看出桥墩中部点的有效应力在迎爆面较大,这是由于迎爆面受冲击较大,另外较大的两个点分别为A、D,可

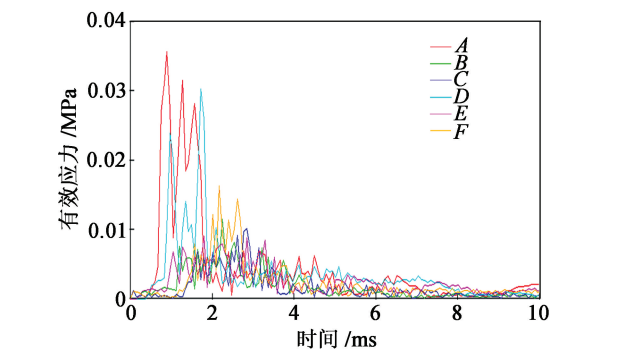


图4 有效应力时程曲线

Fig.4 Time history curves of effective stress

以看出桥趾部位也是受冲击较为严重的部分,应作为重点保护研究部位对待。

同时,选取临近墩身部位的不同水深1、3、5 m的单元,读取其水中冲击波的峰压,并获取其冲量值,结果如表4所示。

表4 冲击波峰压及冲量

Tab.4 Peak pressure and impulse of shock wave

距水底/m	峰值压力/MPa	冲量/(MPa·s)
1	0.412	9.66×10^{-5}
3	0.332	8.54×10^{-5}
5	0.254	9.53×10^{-5}

通过以上研究可以看出,无论是水中冲击波的峰值压力及冲量数值,还是水中桥墩的动态响应参数,都达到了一定的程度,水中冲击波峰压超过了0.4 MPa,测量点处振动接近3 cm/s,对于紧邻的桥梁结构会产生一定程度的影响,使得桥墩处于一个不安全的状态之下,因此,采取设置气泡帷幕的措施来进行水中冲击波削减十分必要。

2.5 设置气泡帷幕工况防护分析

针对不同距离下设置气泡帷幕的工况进行模拟研究,选取与无气泡帷幕时同样的测点并对其动态参数进行分析比较,其基本模型如图5所示,桥墩右侧为气泡帷幕。

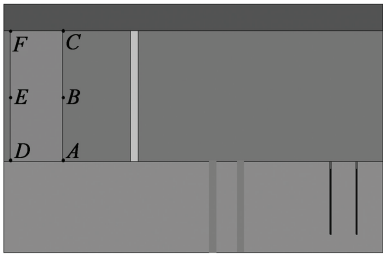


图5 基本模型图

Fig.5 Basic model

图5所示的模型图中,针对计算模型中的桥墩部分,依据实际施工情况及理论,气泡帷幕的设置距离桥墩5 m,据此再分别建立起距离桥墩10、15 m以及无气泡帷幕的模型,分别获取不同测点水平径向、水平切向以及垂直方向的质点速度变化情况,进行分析比较,获得不同工况下桥墩的响应特性。以桥墩中部测点B在气泡帷幕距离桥墩5 m时的情况为例,其水平径向的速度曲线如图6所示,可以看出,其曲线具有明显的瞬时脉冲响应特点,原因在于桥墩迎爆面中部主要受拥有瞬时脉冲特性的水中冲击波影响较为明显,桥墩的响应也会具有瞬时脉冲效应。

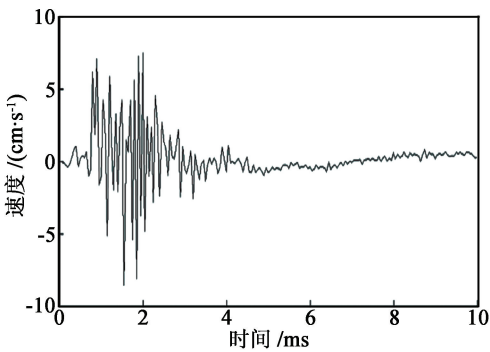


图 6 测点 B 水平径向的速度曲线

Fig. 6 Horizontal radial velocity curve at point B

根据后处理,归纳得到各个测量点的速度参数,总结如表 5 所示。其中 X、Y、Z 分别为水平径向、垂直方向、水平切向。

表 5 测点速度参数

Tab. 5 Velocity parameters at monitoring points

气泡距离 帷幕/m	方 向	迎爆面			背爆面		
		A	B	C	D	E	F
		cm/s					
无	X	1.58	2.92	1.18	1.44	1.86	0.93
	Y	1.56	1.93	0.65	0.95	1.52	1.32
	Z	0.28	0.49	0.17	0.16	0.34	0.29
5	X	0.82	0.91	0.50	1.01	0.85	0.62
	Y	1.12	1.23	0.42	0.61	0.90	0.84
	Z	0.14	0.30	0.10	0.12	0.21	0.16
10	X	1.13	1.36	0.69	1.25	0.96	0.82
	Y	1.33	1.49	0.49	0.74	1.12	0.96
	Z	0.18	0.38	0.14	0.13	0.26	0.20
15	X	1.45	1.59	0.79	1.36	1.07	0.89
	Y	1.38	1.58	0.59	0.84	1.17	1.08
	Z	0.22	0.42	0.15	0.14	0.30	0.24

根据所得数据可知,气泡帷幕在距离桥墩不同距离时削减效果不同,在每个不同方向上削减效果也不同。显然,在距离桥墩 5 m 时,气泡帷幕对质点振动速度的削减最佳,其各点的削减值均大于气泡帷幕距桥墩 10、15 m 时相对于原点的数值,最大由 B 点的 2.92 cm/s 降至 0.91 cm/s,削减度达到 68.8%。以距离 5 m 的组别为例,对其各个测点不同方向的削减程度进行计算,并取其平均值,可以得到如表 6 所示数据,可以看出,水平径向的削减程度最大,平均可达 48.2%,其次是水平切向、垂直方向。

同时,相对于无气泡帷幕工况,在距离桥墩 5 m 设置气泡帷幕条件下,选取临近墩身部位的不同水深 1、3、5 m 的单元,读取其水中冲击波的峰压并获取其冲量,结果如表 7 所示。

表 6 测点速度削减程度

Tab. 6 Velocity reduction at monitoring points

测点	%		
	X	Y	Z
A	48.1	28.2	50.0
B	68.8	36.3	38.8
C	57.6	35.4	41.2
D	26.9	35.8	25.0
E	54.3	40.8	38.2
F	33.3	36.4	44.8
平均值	48.2	35.5	39.7

表 7 削减后冲击波峰值压力及冲量

Tab. 7 Peak pressure and impulse after reduction

距水底/m	峰值压力/MPa	冲量/(MPa·s)
1	0.215	4.59×10^{-5}
3	0.172	4.67×10^{-5}
5	0.128	4.41×10^{-5}

通过对比计算,距水底 5 m 时,峰值压力以及冲量的削减都达到最大值,峰压由 0.254 MPa 降低至 0.128 MPa,削减 50%,冲量由 9.53×10^{-5} MPa·s 降低至 4.41×10^{-5} MPa·s,削弱 54%,可见,气泡帷幕削减效果良好。

3 现场施工及试验监测分析

水下钻孔爆破施工所处的水环境复杂多变,不确定因素较多,使得安全控制有一定难度。现场施工及试验监测是必不可少的环节,对监测数据进行分析并指导参数的调整,对于安全控制意义重大。依据模拟研究,在实际操作过程中,设置气泡帷幕在距离桥墩 5 m 距离处,实施爆破过程中实时监测水中冲击波强度参数和响应规律,并监测分析气泡帷幕的防护削减作用。

3.1 气泡帷幕防护监测分析

现场爆破区域施工时,严格按照工法设置气泡帷幕并布置监测点,其中 1[#]、2[#]、3[#] 监测点分别为气泡帷幕前 12 m、气泡帷幕旁、气泡帷幕后。部分现场监测结果如表 8 及表 9 所示。

据监测数据可见,水中冲击波经气泡帷幕衰减后超压峰值分别由最大的 53.5、192.6 kPa 降至 6.7、16.8 kPa,削减率分别为 87.5%、91.3%,效果较令人满意。可以看出,气泡帷幕作用明显。

3.2 水中冲击波动态传播监测分析

依据工程实际,分别在爆破区域上游深孔与下

表 8 气泡帷幕防护现场监测数据 A

Tab. 8 Monitoring data A on construction site of bubble curtain

药量/kg	20	20	16	14	12	12
1#压力/kPa	47.3	91.9	38.9	13.3	59.9	10.1
2#压力/kPa	18.7	53.5	12.1	6.6	17.2	6.7
3#压力/kPa	最大值 6.7					

表 9 气泡帷幕防护现场监测数据 B

Tab. 9 Monitoring data B on construction site of bubble curtain

药量/kg	20	16	22	16	20	16
1#压力/kPa	29.6	85.6	316.5	80.8	91.9	68.7
2#压力/kPa	6.5	19.1	192.6	35.1	18.5	25.7
3#压力/kPa	最大值 16.8					

游浅孔进行了多次试验,并在不同爆距以及桥墩上设置了多组测点,获取的监测结果如表 10 所示。

一般来说,冲击波压力 p 与时间 t 的函数关系表示如下:

$$p(t)=p_0e^{\frac{-t}{\theta}}。$$

(4)

式中: p_0 为初始峰值压力; θ 为衰减常数。

通过技术手段对上述时程图进行特征点提取并拟合分析,可以获得水中冲击波压力随时间的传播衰减变化为:

$$p(t)=0.029\ 1e^{-28.73t}。$$

(5)

式中: $p(t)$ 为水中冲击波压力,MPa; t 为时间,s。

根据数据对 Cole 公式进行拟合,可以得到上、下游的冲击波压力的衰减规律分别如式(6)、式(7)所示。

上游深孔:

$$\begin{cases} p=12.45\times(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R})^{1.621}; \\ 0.008\ 7<\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}<0.050\ 2。 \end{cases}$$

(6)

下游浅孔:

$$\begin{cases} p=26.78\times(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R})^{1.375}; \\ 0.007\ 9<\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}<0.050\ 3。 \end{cases}$$

(7)

根据式(6)、式(7)可以对现场水中冲击波压力进行预测,以确保水中建(构)筑所受水中冲击波压力处于安全标准范围内。

针对李家沱大桥,其距离爆破区域最近距离约为166m,单段药量取为本次监测中最大药量,上

表 10 水中冲击波现场监测数据

Tab. 10 On-site monitoring data of shock waves in water

位置	测点	爆距/m	测深/m	单段药量/kg	峰压/kPa
上游深孔	1#	77	7.0	40	68.5
	2#	77	3.5	38	38.1
	3#	244	5.0	40	14.8
	4#	200	4.0	40	9.5
	5#	320	5.0	42	8.2
	6#	400	4.0	42	7.6
	7#	76	6.0	36	58.9
	8#	87	6.0	36	23.2
	9#	133	6.0	34	21.5
	10#	250	5.0	36	12.2
	11#	90	近水底	36	44.9
	12#	90	6.0	34	98.0
	13#	90	3.0	34	81.7
	14#	252	5.0	36	7.0
	15#	67	近水底	36	50.4
	16#	67	6.0	36	70.6
	17#	67	3.0	38	43.2
下游浅孔	1#	80	7.0	26	371.7
	2#	80	3.5	26	345.8
	3#	320	5.0	26	66.1
	4#	400	4.0	32	29.1
	5#	54	6.0	20	330.4
	6#	84	6.0	16	124.5
	7#	121	6.0	20	70.9
	8#	323	5.0	20	34.7

游区为 $Q_{\max}=48\text{ kg}$,下游区为 $Q_{\max}=42\text{ kg}$,分别采用式(6)和式(7)进行推算,得到桥墩处爆破超压峰值分别为 0.025、0.131 MPa。上述压力远小于根据国家安全爆破标准以及借鉴其他工程经验提出的压力标准 0.2 MPa,荷载不会对桥墩表面及桥体结构造成破坏,因此桥墩较为安全。

4 结论

通过对紧邻桥梁水中冲击波的数值模拟以及现场监测进行研究,可以得出以下结论:

- 1)通过模拟结果可以看出,气泡帷幕对水中冲击波的削减具有显而易见的效果,无论是峰值压力还是冲量,采用气泡帷幕后,削减率分别高达 50%和 54%。因此,在对水中冲击波的有害作用进行控制时,气泡帷幕是一种极其有效的方法。
- 2)水下钻孔爆破时,水中冲击波作用下不同时

刻桥墩的动态响应不同,各点的速度及加速度响应状况均以水平径向最大,这很好地说明了水中冲击波的增量方向主要为水平径向。桥墩桥趾和中部点的有效应力在迎爆面较大,这是由于迎爆面受冲击较大。气泡帷幕的设置的确可以削弱桥墩对水中冲击波的动态响应程度,各个测点的振动速度均有一定程度的减弱,尤其以距离被保护对象 5 m 时效果最佳,测点速度最大由 B 点的 2.92 cm/s 降至 0.91 cm/s,削减度达到 68.8%。水平径向的削减程度最大,平均达到 48.2%,其次是水平切向、垂直方向。

3) 实际监测中,可以看出水中冲击波强度受到气泡帷幕作用衰减之后,超压峰值分别由最大的 53.5、192.6 kPa 降至 6.7、16.8 kPa,削减率分别为 87.5%、91.3%,效果极佳,极大地抑制了桥墩的动态响应程度,与模拟结果规律保持一致。根据监测数据获取的经验公式,可计算得出桥墩处于安全的状态之下,虽受到冲击波的影响,但不会对桥墩表面及桥体结构造成破坏。

参 考 文 献

- [1] 周凡. 水下爆破工程的安全及控制探讨[J]. 中国水运, 2014, 14(8): 356-357, 359.
- [2] 陈春歌, 申志兵, 张贤凯, 等. 水下爆破冲击波危害及安全控制措施的模拟分析[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(1): 58-61.
CHEN C G, SHEN Z B, ZHANG X K, et al. Simulation of underwater explosion shock hazards and safety control [J]. Safety and Environmental Engineering, 2011, 18 (1): 58-61.
- [3] 赵为, 梁作民, 郭成喜. 水下近场爆破安全控制[J]. 水运工程, 2007, 33(9): 159-164.
ZHAO W, LIANG Z M, GUO C X. Safety control of underwater near-site explosion[J]. Port & Waterway Engineering, 2007, 33(9): 159-164.
- [4] 张鹏翔, 顾文彬, 叶序双. 浅层水中爆炸冲击波切断现象浅探[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 221-228.
ZHANG P X, GU W B, YE X S. Discussions of blasting shock waves cutoff in shallow-layer water[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 221-228.
- [5] LIU J H, WU Y S, ZHAO B L, et al. A simplified method for analyzing the response of GRP ship to underwater explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2000, 4(3): 51-58.
- [6] 李裕春, 刘强, 毛益明, 等. 浅层水中冲击波作用下混凝土墩的动态响应分析[C]//第七届全国工程结构安全防护学术会议. 宁波, 2009: 81-87.
- [7] 彭亚雄. 水下钻孔爆破地震波与水击波协同作用下桥墩动力响应特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
PENG Y X. Study on the dynamic responses of bridge piers under the synergistic effects of seismic wave and water shock wave induced by the underwater drilling and blasting[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.
- [8] 谢达建, 吴立, 洪江, 等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削弱作用研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 72-77.
XIE D J, WU L, HONG J, et al. Study on weakening effect of bubble curtain on water shock wave in underwater blasting[J]. Yangtze River, 2018, 49(8): 72-77.
- [9] 刘欣, 顾文彬, 陈学平. 气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的数值模拟研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 79-84.
LIU X, GU W B, CHEN X P. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain[J]. Blasting, 2015, 32(3): 79-84.
- [10] 齐世福, 刘新波, 李裕春. 水下钻孔爆破的数值模拟[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 13-17.
QI S F, LIU X B, LI Y C. Numerical simulation of underwater drilling blasting [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4): 13-17.
- [11] 殷秀红, 钟冬望, 黄小武, 等. 水下钻孔爆破岩石各区应力的数值模拟[J]. 爆破, 2014, 31(4): 11-15, 53.
YIN X H, ZHONG D W, HUANG X W, et al. Numerical simulation of rock stress of underwater drilling blasting[J]. Blasting, 2014, 31(4): 11-15, 53.
- [12] 张兵文, 张文扬, 吴暖, 等. 预裂爆破与气泡帷幕技术在水下爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2015, 21(5): 6-9.
ZHANG B W, ZHANG W Y, WU N, et al. Application of presplitting blasting and air bubble curtain technologies in underwater blasting[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5): 6-9.
- [13] 胡伟才, 吴立, 舒利, 等. 不同设置方式下气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17): 33-38.
HUI W C, WU L, SHU L, et al. Influence of water shock wave on attenuation characteristics under bubble curtain with different settings[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(17): 33-38.
- [14] 贾虎, 沈兆武. 空气隔层对水中冲击波的衰减特性[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 61-66.
JIA H, SHEN Z W. An investigation into attenuation of underwater shockwave by air interlayer[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(1): 61-66.