

航道扩建工程水下炸礁爆破振动 安全性判据研究

张建球, 廖德华, 唐梦君

(广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 水下炸礁爆破作为航道建设、扩建和疏浚工程中的重要环节, 也是影响整个工程效率和安全的主要因素。为了分析爆破影响因素对安全性判别的影响, 进行现场监测研究, 采用考虑振速-频率双重影响因素和考虑振速-频率-爆破持续时间三重影响因素的研究方法对现场监测结果进行对比分析, 得到拟合公式及相应的拟合精度。结果表明, 三重影响因素公式的拟合精度更高; 水下爆破引发振动时应考虑爆破持续时间这个重要的影响因子; 式(5)为适用于水下爆破工程安全性的最优判据法。

关键词: 航道扩建; 水下爆破; 安全性的判据法; 现场监测试验

中图分类号: U 615.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0130-05

Study on safety criterion of underwater reef blasting vibration for channel expansion engineering

ZHANG Jian-qiu, LIAO De-hua, TANG Meng-jun

(Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: Underwater reef blasting, as an important link in waterway construction, expansion, and dredging engineering, is also the main factor affecting the efficiency and safety of the whole project. To analyze the influence of blasting effect factors on the safety discrimination, we carry out the study on the field monitoring, adopt double factors of velocity-frequency and blasting vibration speed-frequency-duration of blasting with triple factors in research methods to compare and analyze the results of the field monitoring and obtain the fitting formula and the corresponding fitting accuracy. The results show that the formula of triple factors has a higher fitting precision. The duration of blasting should be considered as the important effect factor when underwater blasting induces vibration. Formula (5) is the optimal criterion method suitable for the safety of underwater blasting engineering.

Keywords: channel expansion; underwater blasting; criterion method of safety; field monitoring test

水下炸礁爆破是航道建设、扩建和疏浚施工中的一种重要手段, 具有良好的效率性和经济性。但是爆破产生的冲击波、地震动及爆破涌浪等次生灾害会对周围环境产生不利影响^[1-2], 因此爆破施工安全性的判据得到国内外相关学者的广泛关注^[3-7]。

水下爆破施工过程中最常见的问题是爆破引

起的地震动对附近建(构)筑物(居民楼房、工业和商业建筑以及一般古建筑等)的稳定性和安全性的影响, 目前主要的安全评价指标有: 振动速度、振动频率和振动持续时间等^[8-9]。对于实际工程而言, 考虑因素过于单一无法反映出构筑物因爆破导致的受迫振动的真实状态, 目前已经不再应用于工程。近年来, 国内部分水下工程上采用质点

振速大小作为安全评判标准, 认为振速小则影响小, 忽略了频率的影响, 则导致实际爆破过程对附近建(构)筑物产生一定的损害^[10]。因此, 目前各国工程师和学者在原安全规范标准的基础上, 提出了振速-频率的双因素安全判据^[11], 在多个国家的爆破工程领域得到了广泛应用。

随着爆破工程领域的精进与发展, 爆破振动持续时间对安全性的影响逐渐得到了国内外学者的热切关注, 有学者认为爆破振动持续时间会导致振动叠加, 从而可能影响结构动力响应特征^[12], 影响建(构)筑物安全性。长期以来, 水下爆破的复杂环境导致试验模型的可行性低, 严重阻碍爆破技术的发展; 除此, 国内外大多数水下爆破研究都偏向于理论性研究, 缺少实际工程中的实时监测数据, 实际应用价值较低。综上所述, 本文通过水下爆破施工现场监测试验实测数据, 对上述安全性判据方法进行逐一分析, 旨在得出适用于实际水下爆破工程安全性的最优判据法。

1 工程概况

现场试验的地点位于郁江贵港市区河段的牛皮滩, 上距贵港船闸 3 km, 贵港郁江大桥从滩中穿过。该浅滩长约 3 km, 航段位于贵港枢纽下游贵港市区, 航段内有青云大桥、贵港郁江大桥, 贵港郁江大桥上游 130 m 处有贵港市自来水公司 1 根跨河供水管道, 现过河管道长 485 m, 管径 820 mm, 管壁厚 12 mm, 过河管道顶高程为 22.13 m, 管道处设计最低通航水位 29.23 m, 设计航道底高程为 25.13 m, 管道埋置深度满足通航要求。桥区采用双孔单向通航, 单孔净宽为 60 m, 桥区航道宽度 120 m, 该河段为微弯河段, 河面宽约 330 m, 浅段长约 2.8 km, 航道中存在的主要问题是水深不足。

通过地质钻探资料揭示该浅滩礁区覆盖层为卵石, 含少量砾砂, 表现为松散状态, 土类级别为 11 级, 卵石厚度为 0.20~2.80 m, 平均 0.72 m。礁石为中风化泥岩、含少量中风化泥质粉砂岩, 饱和抗压强度为 10.0~49.1 MPa, 绝大部分在 10~30 MPa, 级别为 15 级。中风化泥岩厚度为

0.30~1.50 m, 平均 0.90 m。

考虑牛皮滩位于贵港市区, 两岸建筑物及码头分布密集, 且其位于青云大桥及贵港市西江大桥区域。在贵港西江大桥附近, 桥梁上游约 130 m 处有 1 条过江管道, 爆破开挖施工涉及西江大桥 2 个通航孔、3 个桥墩及水下过江管道, 对该桥及管道的安全威胁很大。因此从安全角度进一步考虑, 牛皮滩现有过江管上游 100 m—西江大桥下游 100 m(即 ZH3+080~ZH3+400)段礁石采用水下液压破碎施工方案, 减小施工对桥墩及管道的影响, 其余范围采用控制爆破施工方案。

2 爆破监测点位置与试验设备

2.1 水下爆破监测点位置

本次试验爆破区域处于西江大桥下游牛皮滩, 监测试验在现场爆破施工时进行, 总共测试施工期间的 3 次爆破, 每次爆破设置 1 条测试段, 根据以往监测经验和现场施工情况, 测试段的起点布置在航道爆破区的近岸位置, 测点依次向内陆延伸。每条测试段布置 3~4 个测点, 同时保持爆破点与各测点处于同一条直线。其中试验段 A、B 和 C 各测点的爆心距的范围分别为: 182.0~230.5 m、168.8~279.7 m 和 164.7~224.6 m。爆破区(点)和试验段的布置见图 1(右上图例表示爆破点与试验段的对应关系)。



图 1 水下爆破区和试验测点位置

2.2 试验设备

本次现场试验研究测试采用多台 TC-4850 振动测仪, 频率范围为 5~300 Hz, 量程为 0~35 cm/s, 分辨率为 0.01 cm/s, 读数精度为 0.1%, 触发电平范围为 0~10 V(0~35 cm/s)任意可调节。设置电平

值(触发阈值)为 0.1 cm/s, 触发后单次采样时间为 2 s。安装时应注意首先确定传感器水平轴方向与爆破点方向一致, 然后用手掌平压三矢量传感器, 并在用力过程中左右带动传感器, 能有效防止粘连不均匀、传感器与石膏之间存在气泡等, 保证传感器与被检面的刚性连接。TC-4850 振动测试仪具有抗震动、抗电磁干扰、高灵敏度、高可靠性等特点, 集自带电源、自动触发、自动采集

等优点于一体的先进仪器, 适合各种野外的复杂环境振动波测试, 配套软件 Blasting vibration analysis 具有计算、分析、绘图等功能, 保证了测试结果的准确性和及时性。

3 爆破监测结果与分析

现场监测数据由试验监测设备配套软件中提取, 见表 1。

表 1 现场监测数据

测试段号	测点序号	最大单段药量 Q/kg	爆心距 R/m	爆破持续时间 t/s	x 方向振动频率 f_x/Hz	y 方向振动频率 f_y/Hz	z 方向振动频率 f_z/Hz	x 方向振速峰值 $v_x/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	y 方向振速峰值 $v_y/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	z 方向振速峰值 $v_z/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	合速度峰值 $v/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
A	1	6	267.1	1.07	16.88	17.02	19.05	0.11	0.06	0.08	0.12
	2		302.2	1.10	17.17	17.70	23.12	0.10	0.07	0.08	0.12
	3		321.9	1.29	19.23	19.51	21.16	0.06	0.03	0.06	0.09
B	1	6	168.8	1.34	20.41	22.99	29.63	0.13	0.08	0.12	0.16
	2		178.8	1.10	24.85	25.48	26.85	0.14	0.11	0.10	0.15
	3		207.5	1.07	22.86	19.61	27.59	0.14	0.05	0.09	0.15
	4		279.7	1.36	14.93	26.85	20.20	0.06	0.03	0.07	0.08
C	1	6	164.7	0.96	27.21	31.01	22.60	0.11	0.13	0.20	0.22
	2		181.1	1.17	31.50	27.97	25.32	0.13	0.15	0.16	0.19
	3		201.4	1.16	22.73	17.62	20.94	0.11	0.08	0.13	0.14
	4		224.6	0.94	18.61	20.51	13.47	0.08	0.06	0.12	0.13

3.1 振速-频率双重影响因素对爆破安全性的影响

通过目前国内外及大量的分析和研究成果, 结合萨道夫斯基提出的经验公式^[13-15], 提出如下考虑频率影响爆破振动速度理论计算模型:

$$v_f = B_f K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v_f 为考虑频率影响质点爆破单向振动速度峰值大小(cm/s); K 为与地质、爆破方法等因素有关的系数; α 为与地质条件有关的地震波衰减系数; Q 为与 v_f 值相对应的最大一段起爆药量(kg); R 为测点与爆心的直线距离(m), 即爆心距; B_f 为跟频率有关的动态响应影响系数, 计算公式如下:

$$B_f = \frac{1}{K_\beta \lg \frac{f}{f_0}} \quad (2)$$

式中: f_0 、 f 分别为构筑物的自振频率(Hz)、所测质点振动频率(Hz), f_0 一般小于 10 Hz; K_β 为频率比例系数, 当 $f/f_0 < 5$ 时 K_β 为 1~2, 当 $f/f_0 > 5$ 时 K_β 为 2~4。

通过式(1)可以求得频率影响下的质点爆破振动速度峰值大小, 具有一定的工程参考价值。但是式(1)中的关键参数 B_f 需要先通过判断 f/f_0 的大小才能得到频率比例系数 K_β 的粗略范围, 因此可见, 该经验公式在实际工程中的准确性欠佳, 实用性不强。

现阶段我国实际爆破工程中综合考虑振速和频率双重因素并广泛应用的依据是《爆破安全规程》^[16], 见表 2 和式(3)。

表2 爆破振动安全允许值

保护对象类别	安全允许质点振动速度 v (cm·s ⁻¹)		
	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz
土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15~0.45	0.45~0.90	0.90
一般民用建筑物	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0
工业和商业建筑物	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0
一般古建筑与古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5
运行中的水电站及发电厂中心控制室设备	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9
水工隧洞	7~8	8~10	10~15
交通隧道	10~12	12~15	15~20
矿山巷道	15~18	18~25	20~30
永久性岩石高边坡	5~9	8~12	10~15

爆破振动衰减规律影响因素较多, 最主要的影响因素有延迟爆破时的单段最大药量或齐发总药量、爆心距, 主要通过萨道夫斯基公式^[17-18]表达:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中: v 为质点速度峰值; Q 为齐发爆破总药量或延时爆破最大单段药量; R 为爆心距; K 和 α 为爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, 可以通过现场试验反演算推出。

将式(3)通过自然对数变为线性方程:

$$\ln v = \ln K + \alpha \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right) \quad (4)$$

将表1现场实测试验数据代入式(4)通过最小二乘法线性拟合, 为安全起见, 以合速度大小作为质点速度峰值 v 代入进行计算, 即可得拟合的经验公式 $\ln v = 4.25 + 1.30 \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$, 拟合精度 $R^2 = 0.7236$, 此时参数 $K = 70.11$ 、 $\alpha = 1.30$ 。拟合过程见图2。

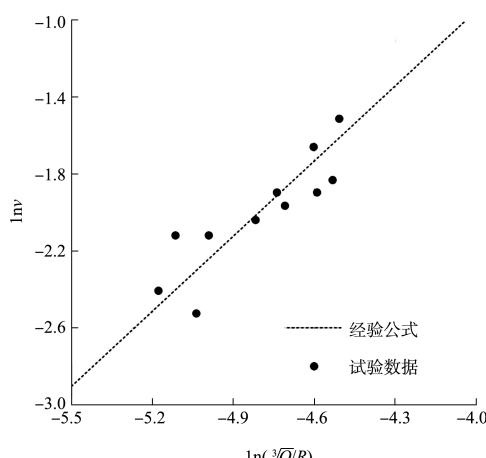


图2 实测爆破振动数据拟合

通过拟合精度较高的经验公式不仅能较好地预测后控制爆破最大单段药量和爆心距, 在保证高效率施工的情况下, 避免水下爆破施工对周围建筑的危害; 而且还可以利用反推演算得到的 K 和 α 值, 对照《爆破安全规程》中国区域的 K 、 α 值(表3)验证工程前期勘探的爆区岩性特征, 进而实时优化爆破施工方案。

表3 爆区不同岩性的 K 、 α 值

岩性	K	α
坚硬岩石	50~150	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

3.2 振速-频率-爆破持续时间影响因素对爆破安全性的影响

爆破振动持续时间长引起的地震波破坏能力更大。相关研究发现振动持续时间从 1 s 增至 50 s, 破坏能力平均增大 40 倍^[19]。在持续爆破振动影响下, 附近岩体从裂隙发展直至破坏, 同时建(构)筑物振动速度允许值下降(降低至原值的 1/2 甚至更低^[20]), 严重危害附近岩体和建(构)筑物的安全稳定性。从结构的角度而论, 结构变形在超过弹性极限后可能会导致受迫振动物体的强度下降, 具体表现为 2 个方面: 1) 线性体系中, 结构变形较大值的发生概率随振动持续时间的增加而增大; 2) 非线性体系中, 振动持续时间的增加会导致结构内部产生永久变形的概率提高。故可以认为爆破振动作用下, 结构物的损坏程度会随振动持续时间的上升而上升。因此, 探讨爆破振动持续时间的影响因素对爆破振动安全判据研

究具有重要的理论价值和工程意义。近年来有学者参考萨道夫斯基公式，如高富强等^[21]通过量纲分析法得出爆破持续时间的关系式：

$$t \cdot \frac{v}{R} = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

式中： t 为爆破持续时间； v 为爆破振动速度峰值大小；其他参数含义同式(3)。

为验证式(5)对水下爆破振动的适用性，将该式左右两边取自然对数，将表 1 数据代入进行计算。为安全起见，此处 v 也取合速度峰值。在确定振动持续时间时，合速度的爆破振动曲线较为曲折，但总体趋势呈现为随时间逐渐衰减，当合速度的振幅值衰减至触发阈值(0.01 cm/s)，且后续没有出现大于触发阈值时，从触发至此刻的时间则为爆破振动持续时间。验证结果见图 3。

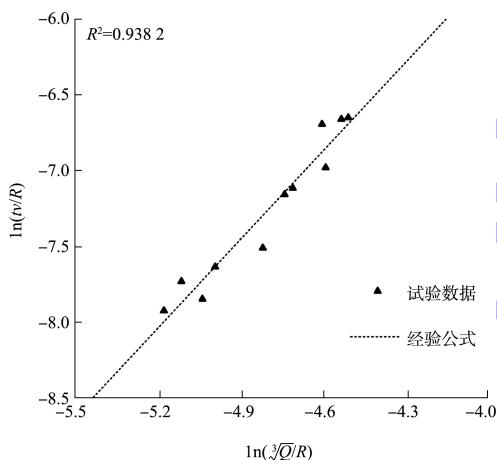


图 3 考虑爆破持续时间影响下的经验公式拟合

根据一元线性回归方程，采用最小二乘法进行拟合，得到本次水下爆破监测下的预测公式为 $tv/R = 7.70 (\sqrt[3]{Q}/R)^{1.94}$ ，拟合精度 $R^2 = 0.9382$ 。拟合精度较高，说明该式与本次试验的结果有较好的相关性，将爆破持续时间 t 作为影响因子加入萨道夫斯基公式，能更好地预测水下爆破振动引起附近地面振动的影响范围和质点振动速度大小。

4 结论

1) 考虑振速-频率双因素判据法中的萨道夫斯基公式对安全性的判据较为合理，将质点振动速度和振动频率两个重要因素作为重要影响因子考

虑在判据方法中，同时结合我国的《爆破安全规程》的爆破振动安全允许值，可为水下爆破工程实践提供较好的预测和指导。

2) 爆破振动持续时间一定程度上影响建(构)筑物在反复的水下爆破振动冲击作用下产生累计损伤程度，本文研究爆破持续时间对安全性的影响，发现对于环境复杂的水下爆破工程中安全性的判据，加入爆破持续时间这个影响因子显得更为合理和适用，可为我国爆破工程行业标准和规范的编制与修订提供参考。

参考文献：

- [1] 覃贤.浅谈内河航道水下炸礁工程的施工方法[J].中国水运(下半月),2013,13(5):123-124,141.
- [2] 王丽丽.爆破技术在码头基础施工中的应用[J].港口科技,2016(3):13-16.
- [3] 胡春红.邻近栈桥在水下爆破地震作用下的动力响应及安全性评价[D].大连:大连理工大学,2006.
- [4] 陈春晖,吴立,赵均文,等.水下钻孔爆破对紧邻建(构)筑物安全性影响研究[J].爆破,2016,33(2):117-122.
- [5] 罗亿,卢文波,陈明,等.爆破振动安全判据研究综述[J].爆破,2010,27(1):14-22.
- [6] 苏莹,吴立,彭亚雄,等.紧邻建(构)筑物水下爆破振动安全判据研究综述[J].爆破器材,2016,45(3):55-61.
- [7] 罗明荣,余俊,赵明生,等.响应速度安全判据在爆破振动分析中的应用[J].矿业研究与开发,2010,30(5):94-96.
- [8] 高原.基于地震波能量的边坡爆破安全评价方法研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2016.
- [9] 唐飞勇,王家忠,崔正荣,等.能量判据在爆破振动安全中的应用初探[J].爆破,2009,26(4):85-88.
- [10] 言志信,王永和,江平,等.爆破地震测试及建筑结构安全标准研究[J].岩石力学与工程学报,2003(11):1907-1911.
- [11] 陶刘群,于亚伦.爆破振动安全判据三大核心问题研究[J].金属矿山,2012(10):127-129.
- [12] 张志呈.爆破地震参量与振动持续时间[J].四川冶金,2002(3):1-4.
- [13] 张雪亮,黄树棠.爆破地震效应[M].北京:地震出版社,1981.