

探索西江“龙圩水道” 水下延时爆破降低震动传播速度参数选取

张利洪

(长江重庆航道工程局 重庆 400100)

摘要:为解决西江“龙圩水道”水下爆破整治工程临近高楼居民对震感的特殊要求,探索将爆破震动传播速度降低到了 0.5m/s 以下延时爆破参数选取。通过监测验证达到要求。

关键词:降低震动传播速度;延时爆破;爆破参数;监测验证

中图分类号: U615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0079—05

“黄金水道”西江“龙圩水道”水下延时爆破整治工程临近梧州主城区。岸边高楼及建筑物比较复杂,对爆破震动及空气冲击波要求高。震动传播速度超过 0.5m/s 时,居民楼 15 层以上人为感觉震动比较强烈。探索水下延时爆破降低震动传播速度参数选取。

“延时爆破”技术具有爆破震动小,空气冲击波及飞石危害小,爆堆“大块率”和能耗均低,能够提高炸药利用率等特点。“水下爆破”技术采用“簇联”起爆网路。

1 工程概况

1.1 工程周边建筑物情况

西江航运干线贵港至梧州 3000 吨级航道工程“龙圩水道”位于梧州主城区,南岸楼房比较多。南北两岸

已建防洪堤,岸坡较为稳定。经卫星地图实测,南岸防洪堤最近距离约 110m。爆区最近点距“江南明珠”小区 256m,距“龙翔百汇”小区 244m,距“水岸名都”小区 190m。爆区周边建筑物如下图:



图 1 工程爆破周边建筑物图

学,2009.

[7] 徐文杰. 基于 CEL 算法的滑坡涌浪研究[J]. 工程地质学报,2012,20(03):350-354.

[8] 徐文杰. 滑坡涌浪影响因素研究[J]. 工程地质学报,2012,20(04):491-507.

[9] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55.

[10] H.P. Zhu, Z.Y. Zhou, R.Y. Yang, A.B. Yu. Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 62(13).

[11] S. Viroulet, A. Sauret, O. Kimmoun, C. Kharif. Granular

collapse into water: toward tsunami landslides[J]. Journal of Visualization, 2013, 16(3):

[12] 谭海. 基于无网格方法的滑坡及滑坡涌浪研究[D]. 武汉大学, 2019.

[13] Pengfei Si, Huabin Shi, Xiping Yu. A general numerical model for surface waves generated by granular material intruding into a water body[J]. Coastal Engineering, 2018, 142:

1.2 居民对爆破震动传播速度要求

西江航运干线贵港至梧州 3000 吨级航道工程“龙圩水道”K0+600-K1+957 段水下钻孔延时爆破作业区临近居民小区。通过监测对比知：当震动传播速度超过 0.5m/s 时，居民楼 15 层以上人为感觉震动比较强烈。这比规范要求要高很多。必须采用合理的爆破参数来减少震动速度。

2 水下延时爆破方案的思路

“龙圩水道”整治工程为水下岩石延时爆破疏浚，专业性较强。采用专用的水下钻孔爆破施工船“竝翔号”进行钻爆施工。船上配备 6 台 150 型潜孔钻机。

采取水下延时控制爆破方案施工。采用毫秒延时起爆网路，分散一次爆破总能的聚集；控制单孔的装药量，限制一次起爆总药量；达到降低震动传播速度，将震动传播速度降低到 0.5m/s 以下。减少爆破施工对周边民房、建筑物的影响确保爆破施工的安全。

3 确定水下延时爆破参数

3.1 延时选取

延时爆破技术在工程爆破中得到了广泛的应用。然而，由于炸药性能、装药结构、介质性质、地质条件等多种因素的复杂性，尤其是群药包先后起爆的延时时间非常之短，一般为几十毫秒甚至几毫秒，从而使如何确定合理的延时时间成了延时爆破技术研究的核心和焦点问题。国内外许多人士对此进行了大量探索性研究，并提出了一系列的确定原则和计算方法。我国长沙矿研院研究认为，先爆药包为后爆药包开创新的自由面，后爆药包应尽可能利用先爆药包所造成的应力场和爆生气体能量促进介质的破碎，通常延时时间为 25~50ms。

本方案通过监测对比确定选择延时 50ms。

3.2 选取钻孔直径

改用直径 90mm 的炮孔代替直径 115mm 的炮孔。整个钻孔采用加密布孔的方法进行钻爆。减少单孔药量，采用孔间延时控制爆破，确保爆破安全。

选取采用钻孔直径为 $\Phi=90\text{mm}$ 钻头进行钻孔， $\Phi 70\text{mm}$ 药卷装药。

3.3 选择布孔方式及孔排距

炮孔布置形式由矩形改为梅花形。为便于定位，避免造成漏爆和补爆及欠挖现象；增加爆破效果。爆破

钻孔采取“梅花”形布孔。

缩短炮孔排距。孔径单耗确定后，根据岩石的坚固系数和爆破作业所处环境以及清渣作业的技术要求，选择合理的最小抵抗线（排距）很重要。

爆破钻孔采取“梅花”形布孔，孔排距为 $3\text{m} \times 1.5\text{m}$ 。

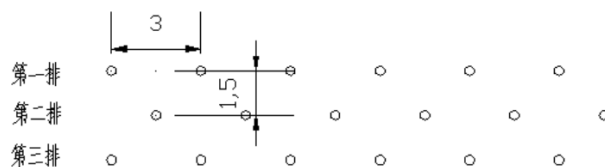


图2 炮孔布置示意图

3.4 超深值的确定

钻孔超深目的降低装药位置，克服底部阻力。根据爆破漏斗原理，避免留有浅埂，确保清渣一次性达设计深度。

钻孔超深： $C=1.0 \sim 2.0\text{m}$ ，硬岩取较大值，软岩取较小值。本工程取 $C=2.0\text{m}$ ，最深孔深控制不超过 5.0m。抛掷爆破中超深形成的爆破漏斗对破裂岩石的影响见下图：

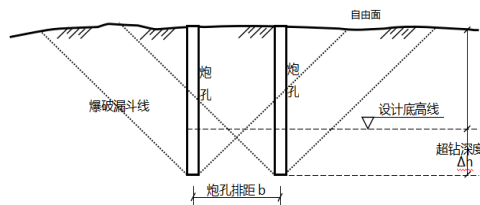


图3 炮孔爆破漏斗叠加示意图

3.5 孔药量计算

根据《水运工程爆破技术规范》，炮孔装药量按下式计算：

$$Q=q_0baH$$

Q ——炮孔装药量 (kg)；

q_0 ——水下爆破单位炸药消耗量 (kg/m^3) (根据施工经验及该水域 4 月 16 日 ~ 5 月 1 日的现场爆破情况，单耗选 $0.8 \sim 1.3\text{kg}/\text{m}^3$ 能满足工程需要，本方案选取)；

b ——钻孔排距 (m)；

a ——钻孔间距 (m)；

H ——钻孔深度 (m)。

钻孔间距 $a=3\text{m}$

钻孔排距 $b=1.5\text{m}$

(钻孔直径 $D=90\text{mm}$ 。药卷直径 $d=70\text{mm}$ ，药卷长

度 30 ~ 35cm, 药卷重量 1.6kg, 药卷线密度 5kg/m。))

岩石开挖厚度: H0=1.0 ~ 3.0m

钻孔深度: H=H0 + C

则单孔装药量参见下表 (超深 C=2.0m)

表 1 单孔装药量表

钻孔深度 H (m)	岩层厚度 H ₀ (m)	孔距 a (m)	最小抵抗线 w (或排距 b (m))	药卷数 (条)	单耗 (kg/m ³)	单孔装药量 (kg)
2.5	0.5	3	1.5	7	1	11.2
3	1.0	3	1.5	8	0.95	12.8
3.5	1.5	3	1.5	9	0.91	14.4
4	2.0	3	1.5	10	0.93	16.8
4.5	2.5	3	1.5	12	0.95	19.2
5.0	3.0	3	1.5	13	0.92	20.8

3.6 装药长度及堵塞长度

装药长度计算公式:

$L=Q/\Delta$

式中 Q——每孔装药量 (kg);

Δ——药卷线密度 (kg/m);

L——装药长度 (m)

根据上式计算结果如下表:

表 2 装药长度及堵塞长度表

钻孔深度 H (m)	药卷直径 d (mm)	每孔装药量 Q (kg)	药卷线密度 Δ (kg/m)	装药长度 (m)	堵塞长度 (m)	实际单耗 (kg/m ³)
2.5	70	11.2	5	2.2	0.3	1.0
3	70	12.8	5	2.5	0.5	0.95
3.5	70	14.4	5	2.9	0.6	0.91
4	70	16.8	5	3.4	0.6	0.93
4.5	70	19.2	5	3.8	0.7	0.94
5.0	70	20.8	5	4.2	0.8	0.93

3.7 装药结构

为确保爆破点周围建筑物的安全,本工程采用分段毫秒延时控制爆破方法。选择逐孔起爆,根据孔药量计算,则单段最大药量为 20.8kg。当确认炸药到达孔底后采用粘土或砂子进行炮孔堵塞,并保证堵塞长度符合设计要求。为防止碎石堵孔及泥沙回淤,钻孔完成后应立即装药。装药前,应先用装药杆 (竹竿) 检查孔壁的质量和孔深。根据爆破厚度 (含超深),现场决定采用起爆体的个数。装药结构如下图所示。

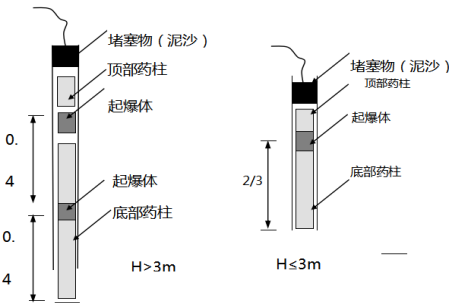


图 4 装药结构示意图

3.8 爆破网路

水下爆破的布孔方式为梅花形布孔方式,每排 6 个孔。由于爆破点至左岸的防洪排涝泵站及居民房等较近,为避免爆破振动对周边建筑物的影响,为确保爆破点周围建筑物的安全,本工程采用分段毫秒延时控制爆破方法,选择逐孔延时起爆。根据孔药量计算知最大单段药量为 20.8kg。

采用孔内分段延时方式。孔内采用高精度抗水导爆管雷管 (毫秒导爆管雷管第三系列) 1、3、5、7、9、11、13、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25 段装孔。孔外采用 1 段簇联。最后击发针击发起爆。爆破网络图如下:

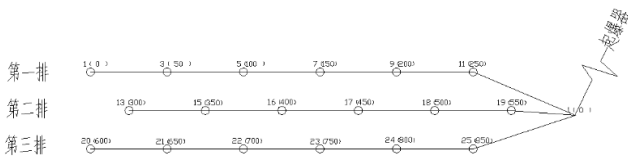


图 5 爆破网路示意图

高精度抗水导爆管雷管延期时间参见下表:

表 3 毫秒导爆管雷管第三系列延期时间表

段别	1	3	5	7	9	11	13	15	16
延期时间 (ms)	0	50	100	150	200	250	300	350	400
段别	17	18	19	20	21	22	23	24	25
延期时间 (ms)	450	500	550	600	650	700	750	800	850

3.9 验算爆破安全距离

在施工过程中,为避免爆破对建筑物的损坏和确保过往船舶和水上水下作业人员安全,水下钻孔爆破采用分段延时起爆控制。依据《水运工程爆破技术规范》和《水下爆破对周围环境影响》,验算爆破安全距离。

3.9.1 爆破地震安全距离验算

根据 $R=(K/V)1/\alpha \times Q^{1/3}$

式中: R----- 爆破地震安全距离 (m);

Q----- 最大一段别用药量 (kg);

V----- 爆破振动安全允许速度 (cm/s);

K、a 与爆破地形、地质有关的系数和衰减指数。

表 4 K、α 取值

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

为了确保爆破地震不破坏周围的建构筑物,根据现场实际情况和《爆破安全规程》(GB6722-2014)选取爆破振动安全允许值。一般民用建筑物的爆破振动安

全允许值取 1.5 ~ 2.0cm/s。本工程爆破施工区的岩石为坚硬岩石，以及项目目前振动监测数据推算可得，取 K=180，取 $\alpha=1.5$ 。

表 5 爆破振动安全允许标准

序号	保护对象类别	安全允许振速 (cm/s)		
		f ≤ 10 Hz	10Hz < f ≤ 50Hz	f > 50 Hz
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.15 ~ 0.45	0.45 ~ 0.9	0.9 ~ 1.5
2	一般民用建筑物	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0
3	工业和商业建筑物	2.5 ~ 3.5	3.5 ~ 4.5	4.2 ~ 5.0
4	一般古建筑与古迹	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5
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
6	水工隧洞	7 ~ 8	8 ~ 10	10 ~ 15
7	交通隧道	10 ~ 12	12 ~ 15	15 ~ 20
8	矿山巷道	15 ~ 18	18 ~ 25	20 ~ 30
9	永久性岩石高边坡	5 ~ 9	8 ~ 12	10 ~ 15
10	新浇大体积混凝土 (C20) :			
	龄期 : 初凝 ~ 3d	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0
	龄期 : 3 d ~ 7 d	3.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0	5.0 ~ 7.0
	龄期 : 7d ~ 28d	7.0 ~ 8.0	8.0 ~ 10.0	10.0 ~ 12
爆破振动监测应同时测定质点振动相互垂直的三个分量。				
注 1 : 表中质点振动速度为三个分量中的最大值，振动频率为主振频率； 注 2 : 频率范围根据现场实测波形确定或按如下数据选取：硐室爆破 f 小于 20 Hz，露天深孔爆破 f 在 10Hz ~ 60 Hz 之间，露天浅孔爆破 f 在 40Hz ~ 100 Hz 之间；地下深孔爆破 f 在 30Hz ~ 100 Hz 之间，地下浅孔爆破 f 在 60Hz ~ 300 Hz 之间。				

一般民用建筑物的安全允许质点振动速度为 1.5 ~ 2.5cm/s，但本项目周边建筑高层居民特殊要求，取安全允许质点振动速度 0.5cm/s 进行验算。

最大单段用药量 Q=20.8kg，经验算得：R=139.2m；

爆区边缘距离江南明珠小区 256m，距龙翔百汇小区 244m，距水岸名都小区 190m，计算结果中验算出的安全距离小于与保护建构筑物的距离。可见只要最大单段炸药量控制在上述范围内，按设计进行施工时，爆破振动符合《爆破安全规程》爆破振动安全允许标准要求。

防洪堤按工业和商业建筑物的安全允许质点振动速度（2.5 ~ 3.5cm/s）取最小值 2.5cm/s 进行验算：

最大单段用药量 Q=20.8kg，经验算得：R=47.6m；

爆区边缘距离防洪堤最近距离约为 110m。计算结果中验算出的安全距离小于与保护建构筑物的距离。可见只要最大单段炸药量控制在上述范围内，按设计进行施工时，爆破振动符合《爆破安全规程》爆破振动安全允许标准要求。

3.9.2 反算保护建构筑物最大振速

根据 $R = (K/V) 1/\alpha \times Q^{1/3}$ 推出 $V = K(Q^{1/3}/R)^{\alpha}$
式中：R----- 爆区中心至保护建构筑物的距离 (m)，其中爆区边缘距离江南明珠小区 256m，距龙翔百汇小区 244m，距水岸名都小区 190m；

V----- 计算出爆破振动速度 (cm/s)；

K、 α 与爆破地形、地质有关的系数和衰减指数。

经上式计算得不同距离时按最大单段装药量的爆破地震波速如下表所示：

表 6 不同距离时按最大单段装药量的爆破地震波速表

不同距离保护对象 (m)	190	244	256	300	320
安全允许质点振动速度 (cm/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
单段最大用量 (kg)	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
质点振动速度 (cm/s)	0.31	0.22	0.20	0.16	0.14

计算结果说明：根据经验公式计算得出，按设计进行施工时，江南明珠小区、龙翔百汇小区、水岸名都小区处的爆破振动速度可控制在 0.31cm/s 以内。按《爆破安全规程》（GB6722-2014）规定一般民用建筑物的爆破振动安全允许值取 1.5 ~ 2.5cm/s。该控制爆破振动值远小于爆破振动安全允许标准值。按设计进行施工时，爆破振动符合《爆破安全规程》爆破振动安全允许标准要求。

在实际施工中，还要通过试爆并对周围的建（构）筑物进行爆破地震监测，然后进行数据分析，实测得出 K、 α 、V 值，对原爆破设计参数进行相应调整。如实测震速超过建筑物的安全测速，则应减少最大段别的爆破炸药量。以确保爆区附近建筑物和人群的安全。

3.9.3 爆破水中冲击波安全距离

根据国标《爆破安全规程》(GB6722 ~ 2014)，爆破冲击波对船舶和人员的安全距离如下页所示：

表 7 爆破水中冲击波对船舶的安全距离

药量 Q (kg)		最小安全距离 R (m)		
		Q ≤ 50	50 < Q ≤ 200	200 < Q ≤ 1000
船舶				
钻孔爆破	木船	100	150	250
	铁船	70	100	150

表 8 爆破冲击波对人员的安全距离

最小安全距离 R (m)		药量 Q (kg)		
		Q ≤ 50	50 < Q ≤ 200	200 < Q ≤ 1000
人员情况				
钻孔爆破	游泳	500	700	1100
	潜水	600	900	1400

根据上表及本工程的一次爆破总装药量情况，冲击波对船舶及人员的安全距离如下：

表 9 冲击波的对船舶及人员的安全距离

船舶	木船 250(m)	铁船 150(m)
人员	游泳 1100(m)	潜水 1400(m)

在起爆前进行警戒时要用巡逻艇在爆破点上、下 1400 米的范围巡逻警戒，当警戒区域内无任何船舶及人员后方可起爆。

4 监测验证

2020 年 4 月 19 日~5 月 1 日 站翔钻 1 号爆破振动监测统计表：

表 10 爆破振动监测统计表

日期	爆破时间	位置	仪器编号	振速最大值				备注
				X	Y	Z	合速度	
4.19	19:00	防洪堤塔楼	SY-07-03-03	0.16	0.17	0.18	0.25	—
		砖房 1	SY-07-03-04	0.06	0.08	0.20	0.21	—
		砖房 2	SY-07-03-05	—	—	—	—	采集异常
		粤东会馆	SY-07-03-11	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	未触发
4.20	18:18	防洪堤塔楼	SY-07-03-05	0.04	0.05	0.09	0.09	—
		砖房 1	SY-07-03-11	0.18	0.18	0.23	0.27	—
		砖房 2	SY-07-03-04	0.14	0.14	0.23	0.26	—
		粤东会馆	SY-07-03-03	0.05	0.02	0.04	0.06	—
4.22	17:45	防洪堤塔楼	SY-07-03-05	0.08	0.06	0.12	0.12	—
		砖房 1	SY-07-03-11	0.24	0.17	0.25	0.30	—
		砖房 2	SY-07-03-04	0.19	0.09	0.15	0.21	—
4.27	18:46	砖房	SY-07-03-04	0.09	0.05	0.12	0.13	—
		海事局	SY-07-03-05	0.06	0.06	0.20	0.21	—
		江南明珠基础	SY-07-03-03	0.10	0.04	0.10	0.10	—
		江南明珠楼顶	SY-07-03-11	0.06	0.04	0.15	0.15	—
4.29	14:46	江南明珠基础	SY-07-03-03	0.07	0.05	0.16	0.16	—
		砖房	SY-07-03-04	0.10	0.05	0.12	0.13	—
		龙翔百汇基础	SY-07-03-05	0.07	0.06	0.06	0.08	—
		江南明珠楼顶	SY-07-03-11	0.08	0.05	0.16	0.16	—
4.30	19:20	江南明珠基础	SY-07-03-03	0.10	0.10	0.11	0.15	—
		砖房	SY-07-03-04	0.10	0.05	0.18	0.18	—
		龙翔百汇基础	SY-07-03-05	0.07	0.06	0.08	0.10	—
		江南明珠楼顶	SY-07-03-11	0.10	0.06	0.20	0.20	—
		龙翔百汇楼顶	SY-07-03-15	0.07	0.06	0.23	0.23	—
5.1	14:18	江南明珠楼顶	SY-07-03-03	0.07	0.05	0.27	0.27	—
		砖房	SY-07-03-04	0.14	0.05	0.26	0.26	—
		砖房	SY-07-03-04	0.14	0.05	0.26	0.26	—
		龙翔百汇基础	SY-07-03-05	0.08	0.05	0.08	0.09	—
		碧水云居基础	SY-07-03-11	0.20	0.11	0.11	0.24	—
		龙翔百汇楼顶	SY-07-03-14	0.04	0.07	0.13	0.13	—
		江南明珠基础	SY-07-03-15	0.12	0.04	0.13	0.13	—

5 结论

(1) 经监测临近爆区 250m 附近，15 层高楼以上居民对爆破震速超过 0.5m/s 时，有震感。

(2) 对临近爆区高楼防震措施，先做爆破监测对比，再选取合理参数，能有效解决居民对震感的特殊要求。

(3) 经监测可知选择合理逐孔延时爆破参数能有效降低震动传播速度，达到 0.5m/s 以下。

参考文献：

[1] 柳振宇，黄建新，张猛等. 复杂爆区逐孔起爆技术应用 [J]. 有色金属 (矿山部分),2010.62(3): 47-50.

[2] 付天光，费鸿禄，张威颖等. 逐孔起爆技术在霍林河露天矿中的试验研究 [J]. 中国矿业，2005.14(11):48-50.

[3] 付天光，张家权，葛勇等. 逐孔起爆延时爆破技术的研究和实践 [J]. 工程爆破，2006.12 (2): 28-31.

[4] 郑瑞春，马柏令，高士才. 爆破参数对破岩质量的影响规律及小抵抗线大孔距爆破机理的探讨. 爆破. 1987，第 2 期.

[5] 郭跃良. 合理选择孔口堵塞长度、改善台阶深孔爆破质量的试验研究. 岩石破碎学术讨论会论文，1986.

[6] 刘建亮，张志毅. 深孔爆破梯段高度的合理选取. 工程爆破论文选编，全国工程爆破第五届学术会议论文选.

[7] 薛礼宽等. 分段微差爆破地震效应的叠加分析. 爆破，1991 (3) .

[8] 《爆破安全规程》(GB6722-2014)

[9] 《水运工程爆破技术规范》(JTS204-2008)

[10] 《爆破安全技术与环境保护》.

