



航道整治水下钻孔爆破振动 传播规律试验研究

罗金先

(广西壮族自治区南宁航道养护中心, 广西 南宁 530000)

摘要: 航道整治水下钻孔爆破振动传播规律同时受高程效应和水体波动效应影响。根据某航道整治工程13组水下钻孔爆破振动试验结果, 分析水下钻孔爆破振动速度和振动频率的传播规律, 探讨能同时反映高差和水体波动影响的水下钻孔爆破振动预测公式。结果表明: 1) 采用三向分量中的最大值开展爆破振动速度预测的精度最高。2) 垂直向Z分量主振频率随距离增大而衰减的规律显著, 在爆破安全监测实践中应重点关注。3) 与萨道夫斯基公式、仅考虑高程效应的修正公式和仅考虑水体波动效应的修正公式相比, 同时考虑高程效应和水体波动效应的修正公式预测精度最高, 且回归方程和回归系数显著, 能够更准确反映水下钻孔爆破振动传播规律。研究结论对航道整治水下钻孔爆破振动安全监测工作具有借鉴意义。

关键词: 航道整治; 水下钻孔爆破; 爆破振动; 传播规律

中图分类号: U616; TU459

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0252-07

Experimental study on vibration propagation law of underwater drilling and blasting for waterway regulation

LUO Jinxian

(Guangxi Zhuang Autonomous Region Nanning Waterway Maintenance Center, Nanning 530000, China)

Abstract: The propagation law of underwater drill hole blasting vibration for waterway regulation is affected by elevation effect and water fluctuation effect at the same time. According to a waterway regulation project 13 groups of underwater drilling and blasting vibration test results, this study analyzes the propagation law of underwater drilling and blasting vibration velocity and vibration frequency, and explores the underwater drilling and blasting vibration prediction formula that can reflect the effect of elevation and water fluctuation at the same time. The results show that: 1) The highest accuracy of blasting vibration velocity prediction is carried out by using the maximum value of the three-way component. 2) The main vibration frequency of the vertical Z-component attenuates with increasing distance, which should be paid attention to in the practice of blasting safety monitoring. 3) Compared with Sadovsky formula, the modified formula considering only elevation effect and the modified formula considering only water fluctuation effect, the modified formula considering both elevation effect and water fluctuation effect has the highest prediction accuracy, and the regression equation and regression coefficient are significant, which can more accurately reflect the vibration propagation law of underwater drilling and blasting. The research conclusions have reference significance for the safety monitoring of underwater drilling and blasting vibration in waterway regulation.

Keywords: waterway regulation; underwater drilling and blasting; blasting vibration; law of transmission

随着船舶大型化、标准化和现代化发展, 航道升级改造成为迫切需要。航道整治工程常采用

水下钻孔爆破的施工方式, 由于水下炸礁区周围环境常涉及地形地质条件复杂、水体介质综合影响

收稿日期: 2024-03-08

作者简介: 罗金先 (1967—), 男, 高级工程师, 从事港航工程技术工作和建设管理工作。

和周围保护对象类型多等特点,在理论和实际工程中都很难准确预测爆破振动传播规律。GB 6722—2014《爆破安全规程》^[1]提供了爆破振动速度预测采用萨道夫斯基公式:

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

式中: v 为振动速度, cm/s; R 为爆源与测点中心的距离, m; Q 为爆破齐发药量或最大单段药量, kg; K 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数; a 为衰减系数。

该公式主要适用于半无限连续介质的理想公式,大量工程实践表明,在场地较平整,且地形、地貌变化不大的条件下此公式预测精度较高,而在地形高程差变化较大的场地该公式适用性较差。对此众多专家学者根据工程的实际特点,对考虑高程效应的相关修正公式进行了研究^[2-10],基于此,DL/T 5333—2021《水电水利工程爆破安全监测规程》^[11]提出了考虑测点至爆源高差、与高差有关系数的高边坡上的爆破振动速度预测公式:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^a \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (2)$$

式中: H 为测点至爆源的高差, m; β 为与高程差有关的系数。该公式对爆破振动传播过程中的高程效应有良好的预测精度。文献[12]分析了水下爆破振动的传播规律,考虑水体波动的影响,在萨道夫斯基公式的基础上提出修正的水下爆破振动速度预测公式:

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

式中: h 为爆源处的水深, m; L 为爆源至岸边的距离, m; h/L 为水深比,露天爆破 h/L 取 1; γ 为水体波动影响衰减因子。修正后的预测公式可以更准确地描述水下爆破振动传播规律。

综上,目前大部分的爆破振动速度预测模型研究主要集中在适用理想场地条件的萨道夫斯基公式和考虑高程效应的修正公式,而针对水下爆破中水体波动因子对爆破振动传播规律的影响,目前只进行了一些初步探讨和试验分析。航道整治工程中常采用的水下钻孔爆破振动传播不仅受高程影响,还受水体波动的影响,同时考虑高程效应和水体波动效应的预测公式尚未出现。

本文以广西某航道整治工程 13 组爆破振动波速试验为背景,分析水下钻孔爆破振动速度和振动频率的传播规律,修正了同时反映高程效应和水体波动效应的预测公式,并验证其适用性。

1 某航道整治工程爆破振动试验

1.1 工程概况

广西某航道整治工程采用水下钻孔爆破的方式炸礁施工,炸礁区航道长约 2.5 km、宽 80 m,岩层厚度最大处 3~4 m,地层岩性主要为中风化灰岩,周围地形主要为河流堆阶地分布,高程普遍为 50~120 m,阶地上常有稀落低矮的残峰分布,河谷宽 400~600 m 不等,岸坡高度 25~35 m。爆破区距离左岸(北侧)最近的民房 173 m,距离右岸最近的民房 262 m。炸礁区与周围岸坡地形分布断面见图 1。

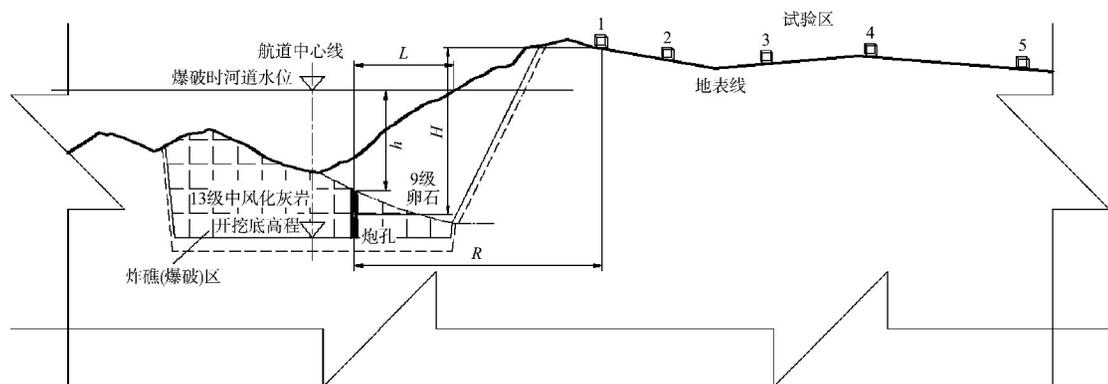


图1 炸礁区与周围岸坡地形分布断面及试验测点布置

1.2 爆破方案

爆破采用防水性能较好的乳化炸药,直径 90 mm,每节约卷长 40 cm,质量 3.0 kg,用数码电子雷管作为起爆元件。炮孔采用垂直方式布置,钻孔直径 115 mm,设计孔排距参数为 (2.5~2.8) m × (2.0~2.3) m,采用梅花形布孔,超深 1.5~2.5 m。爆破网络采用毫秒微差起爆网络,以确保微差网络的实现。起爆网络采用 1、3、5、7、9、11 段毫秒进行孔内装药,孔外采用 1 段毫秒雷管进行簇式连接或采用 1、2、6、8、10 段毫秒雷管进行簇式连接,形成 6 个段别的延期起爆网络。

1.3 试验测点布置

爆破振动传播规律试验测点布置于临近爆破

区河道左岸平坦的阶地上,每组试验以爆源为中心成一条直线接近密远疏依次布置 5 个测点,测点布置见图 1。

2 试验结果

现场采用 TC4850 爆破测振仪自动测试 3 个分量的振动速度和振动频率,爆源与测点的距离和高程差通过 GPS 测量,采用 MATLAB 和 SPSS 软件进行线性回归拟合分析,每组试验开始前记录爆源处水深深度和爆源距离岸边(试验断面)的水平距离,总共连续开展 13 组爆破试验(其中 A~G 组试验点的位置一致;H~M 组试验点的位置一致),试验结果见表 1。

表 1 13 组爆破试验数据

试验组别	编号	距离 R/m	最大单段药量 Q/kg	与爆心高程差 H/m	水深 h/m	河岸距 L/m	X 向振速 $v_x/(cm \cdot s^{-1})$	X 向主频 F_x/Hz	Y 向振速 $v_y/(cm \cdot s^{-1})$	Y 向主频 F_y/Hz	Z 向振速 $v_z/(cm \cdot s^{-1})$	Z 向主频 F_z/Hz
A	1	77.8	24	57.0	3.12	12.05	0.91	8	0.62	8	0.44	16
	2	89.7	24	57.6	3.12	12.05	0.49	20	0.39	17	0.60	75
	3	109.4	24	57.7	3.12	12.05	0.17	22	0.18	9	0.42	34
	4	134.8	24	57.9	3.12	12.05	0.15	17	0.17	16	0.31	33
	5	206.7	24	59.2	3.12	12.05	0.21	20	0.12	51	0.26	33
B	1	57.4	30	57.0	3.18	6.12	1.70	12	1.67	7	2.79	56
	2	69.2	30	57.6	3.18	6.12	0.59	10	0.75	11	1.83	37
	3	87.2	30	57.7	3.18	6.12	0.48	17	0.45	21	1.06	35
	4	112.0	30	57.9	3.18	6.12	0.51	18	0.67	29	0.77	30
	5	182.0	30	59.2	3.18	6.12	0.23	63	0.19	21	0.39	28
C	1	60.4	30	57.0	3.15	4.03	1.17	13	1.31	16	1.34	51
	2	72.4	30	57.6	3.15	4.03	0.41	10	0.54	9	0.82	44
	3	90.5	30	57.7	3.15	4.03	0.35	17	0.34	13	0.50	36
	4	115.4	30	57.9	3.15	4.03	0.37	17	0.32	47	0.43	31
	5	185.6	30	59.2	3.15	4.03	0.07	50	0.14	20	0.18	27
D	1	60.5	30	57.0	3.20	3.08	0.93	13	1.03	16	0.91	52
	2	72.7	30	57.6	3.20	3.08	0.32	9	0.41	9	0.77	38
	3	91.2	30	57.7	3.20	3.08	0.30	16	0.17	20	0.38	34
	4	116.3	30	57.9	3.20	3.08	0.31	17	0.15	55	0.28	30
	5	186.9	30	59.2	3.20	3.08	0.06	56	0.11	22	0.14	27
E	1	63.4	27	57.0	3.14	2.40	0.75	13	0.76	16	0.60	58
	2	75.6	27	57.6	3.14	2.40	0.26	13	0.27	9	0.51	33
	3	94.2	27	57.7	3.14	2.40	0.28	17	0.15	16	0.30	33
	4	119.4	27	57.9	3.14	2.40	0.28	22	0.13	44	0.22	30
	5	190.0	27	59.2	3.14	2.40	0.05	56	0.07	16	0.12	26

续表1

试验组别	编号	距离 R/m	最大单段药量 Q/kg	与爆心高程差 H/m	水深 h/m	河岸距 L/m	X 向振速 $v_x/(cm \cdot s^{-1})$	X 向主频 F_x/Hz	Y 向振速 $v_y/(cm \cdot s^{-1})$	Y 向主频 F_y/Hz	Z 向振速 $v_z/(cm \cdot s^{-1})$	Z 向主频 F_z/Hz
F	1	63.4	27	57.0	3.24	2.00	0.79	13	0.85	17	0.65	44
	2	75.7	27	57.6	3.24	2.00	0.24	17	0.31	10	0.58	34
	3	94.5	27	57.7	3.24	2.00	0.28	17	0.19	18	0.33	31
	4	119.8	27	57.9	3.24	2.00	0.29	17	0.21	49	0.23	30
	5	190.7	27	59.2	3.24	2.00	0.05	55	0.09	23	0.13	28
G	1	66.7	27	57.0	3.15	1.71	0.80	13	0.69	16	0.56	58
	2	79.0	27	57.6	3.15	1.71	0.26	14	0.27	11	0.46	31
	3	98.0	27	57.7	3.15	1.71	0.30	17	0.15	38	0.30	31
	4	123.3	27	57.9	3.15	1.71	0.28	17	0.14	47	0.22	34
	5	194.4	27	59.2	3.15	1.71	0.05	58	0.07	14	0.13	22
H	1	201.5	30	58.6	3.20	10.04	0.28	9	0.22	11	0.21	10
	2	216.4	30	59.0	3.20	10.04	0.23	9	0.24	10	0.26	8
	3	246.3	30	59.4	3.20	10.04	0.27	8	0.26	12	0.20	19
	4	286.7	30	60.8	3.20	10.04	0.16	9	0.13	11	0.15	12
	5	324.2	30	64.8	3.20	10.04	0.09	8	0.13	10	0.04	8
I	1	202.6	30	58.6	3.18	5.21	0.22	9	0.20	12	0.23	14
	2	217.5	30	59.0	3.18	5.21	0.19	9	0.24	10	0.27	7
	3	247.4	30	59.4	3.18	5.21	0.25	9	0.26	12	0.19	20
	4	287.7	30	60.8	3.18	5.21	0.17	8	0.11	12	0.13	11
	5	325.1	30	64.8	3.18	5.21	0.08	8	0.14	7	0.14	8
J	1	205.4	30	58.6	2.76	3.33	0.21	8	0.19	11	0.20	21
	2	220.2	30	59.0	2.76	3.33	0.18	9	0.21	10	0.26	10
	3	250.1	30	59.4	2.76	3.33	0.22	7	0.27	13	0.17	20
	4	290.4	30	60.8	2.76	3.33	0.13	8	0.12	11	0.14	12
	5	327.8	30	64.8	2.76	3.33	0.07	8	0.12	10	0.13	8
K	1	206.7	30	58.6	2.68	2.50	0.21	9	0.19	11	0.01	26
	2	221.5	30	59.0	2.68	2.50	0.19	9	0.20	9	0.24	15
	3	251.3	30	59.4	2.68	2.50	0.21	7	0.26	13	0.16	20
	4	291.5	30	60.8	2.68	2.50	0.14	8	0.11	11	0.12	11
	5	328.9	30	64.8	2.68	2.50	0.07	8	0.11	11	0.12	8
L	1	163.5	30	58.6	2.72	2.10	0.33	12	0.36	14	0.01	14
	2	178.5	30	59.0	2.72	2.10	0.21	11	0.22	10	0.46	10
	3	208.5	30	59.4	2.72	2.10	0.30	8	0.31	12	0.27	22
	4	249.0	30	60.8	2.72	2.10	0.23	10	0.14	9	0.14	16
	5	286.6	30	64.8	2.72	2.10	0.07	10	0.13	7	0.14	14
M	1	164.3	30	58.6	2.81	1.67	0.28	7	0.32	12	0.01	15
	2	179.2	30	59.0	2.81	1.67	0.18	10	0.22	13	0.45	12
	3	209.2	30	59.4	2.81	1.67	0.26	12	0.38	13	0.22	13
	4	249.7	30	60.8	2.81	1.67	0.18	11	0.14	13	0.16	17
	5	287.2	30	64.8	2.81	1.67	0.07	6	0.13	8	0.13	15

3 传播规律

3.1 爆破振动速度传播规律

爆破振动测试同时测定质点振动相互垂直的3个分量, GB 6722—2014《爆破安全规程》中规定采用3个分量中振动速度的最大值和主振频率开展爆破振动安全允许标准的判定, 而在分析爆破振动传播规律时, 相关爆破技术规范未明确采用哪个分量开展回归拟合。为分析水下钻孔爆破振动速度和振动频率的传播规律, 采用式(1)分别对水平向X分量、水平向Y分量、垂直向Z分量、三向分量中的最大值和合速度共5个振动速度进行回归拟合。

爆破振动速度13组试验同时回归拟合对比结果见表2, 修正的拟合系数 r^2 水平向X分量、水平向Y分量和垂直向Z分量分别为0.57、0.51和0.40, 均小于三向分量中的最大值0.74和合速度0.71, 说明采用三向分量中的最大值和合速度开展爆破振动速度预测的精度更高, 其中采用三向分量中的最大值开展预测工作效果最好, 这与GB 6722—2014《爆破安全规程》中规定采用3个分量中振动速度的最大值开展爆破振动安全允许标准进行判定相对应。

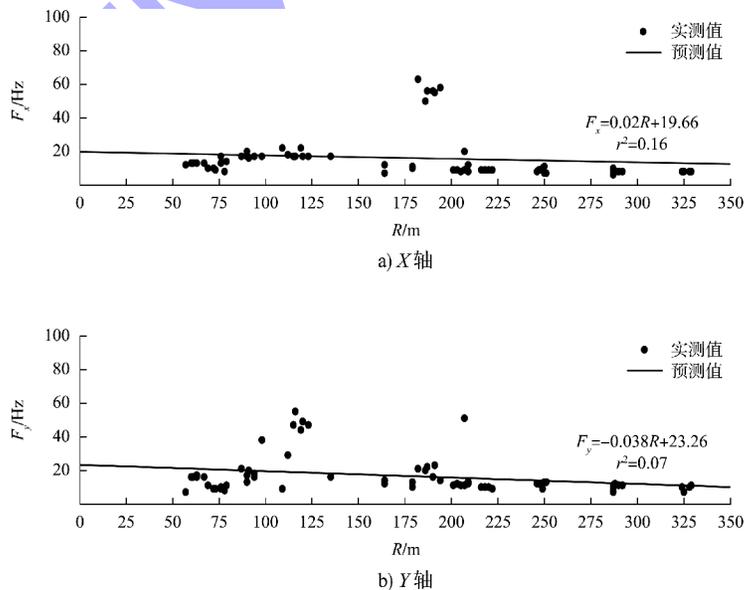
表2 爆破振动速度拟合结果对比

工况	K	a	修正的 r^2
水平 X 方向	17.81	1.12	0.57
水平 Y 方向	9.29	0.95	0.51
垂直 Z 方向	41.89	1.32	0.40
最大值	30.00	1.16	0.74
合速度	29.02	1.13	0.71

3.2 爆破振动频率传播规律

以测点距爆源的水平距离为X轴、以主振频率为Y轴分别对水平向X分量、水平向Y分量和垂直向Z分量共3个主振频率进行回归拟合。

爆破振动频率13组试验同时回归拟合对比结果见图2, 修正的拟合系数 r^2 水平向X分量、水平向Y分量和垂直向Z分量分别为0.00、0.06和0.62, 说明3个分量振动频率的衰减规律随着距爆源距离的增大存在显著差异, 水平向X和Y分量主振频率拟合精度较差, 随距离增大频率衰减的规律不明显, 而垂直向Z分量主振频率拟合精度较高, 随距离增大频率衰减的规律较明显, 因此, 在实际爆破振动监测安全判据中, 除应关注3个分量中振动速度的最大值外, 还应重点关注垂直向Z分量主振频率的衰减变化, 防止垂直向振动频率衰减至接近保护对象固有频率而造成振动破坏。



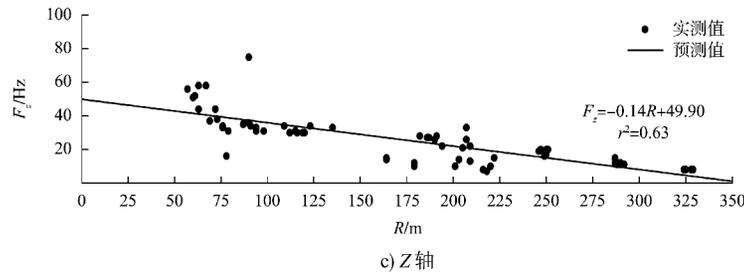


图 2 爆破振动频率拟合结果对比

4 水下钻孔爆破振动速度预测公式

4.1 修正预测公式

水下钻孔爆破受高程差因子和水体波动因子综合影响，现有爆破振动速度预测公式未考虑两者的同时影响，因此对式(2)、(3)预测公式进行修正，描述水下钻孔爆破质点振动速度预测公式为：

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^a \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \left(\frac{h}{L} \right)^\gamma \quad (4)$$

采用振动速度三向分量中的最大值通过式(1)~(4)分别对 13 组试验结果同时进行峰值振动速度拟合，相应的对比结果见表 3，式(1)~(4)修正的拟合系数 r^2 分别为 0.74、0.76、0.77 和 0.79，说明考虑高程效应或水体波动效应的修正公式与萨道夫斯基公式相比，预测精度有一定的提升。其中，同时考虑高程效应和水体波动效应的修正公式预测精度最高，可以更准确地反映水下钻孔爆破振动的传播规律。

表 3 不同预测公式爆破振动速度拟合结果对比

公式	K	a	β	γ	修正的 r^2
(1)	30	1.16	-	-	0.74
(2)	254×10^4	1.01	4.04	-	0.76
(3)	39.85	1.17	-	-0.25	0.77
(4)	259×10^4	1.02	3.94	-0.25	0.79

4.2 显著性检验

式(4)分别通过 F 检验法验证回归方程的显著性和 T 检验法验证回归系数的显著性，相应的检验结果见表 4。由表 4 可知，假设显著性水平 $\alpha = 0.05$ ， F 统计量伴随概率为 $0 < 0.05$ ，说明式(4)回归方程显著；查 T 分布表得自由度为 64 的临界值为 1.998，高程效应和水体波动效应对应的

T 统计量分别为 2.68 和 -3.12，两者的绝对值均大于 1.998，表明式(4)中高程效应和流体波动效应两个因素对因变量振动速度的影响显著。

表 4 式(4)显著性检验结果

显著性 F		变量	显著性 T	
F -statistic	Prob(F -statistic)		T -statistic	Prob(T -statistic)
82.48	0.00	C(常量)	3.56	0.00
		$X_1(R)$	10.77	0.00
		$X_2(H)$	2.68	0.01
		$X_3(L)$	-3.12	0.00

5 结论

1) 与水平向 X 、 Y 分量和垂直向 Z 分量相比，采用三向分量中的最大值和合速度开展水下钻孔爆破振动速度预测的精度更高，其中采用三向分量中的最大值预测精度最高，结果与 GB 6722—2014《爆破安全规程》中规定采用 3 个分量中振动速度的最大值开展爆破振动安全允许标准进行判定相对应。

2) 水下钻孔爆破水平向 X 、 Y 分量和垂直向 Z 分量主振频率随爆源与测点距离增大的衰减规律存在较大差别，水平向 X 和 Y 分量主振频率拟合精度较差，随距离增大频率衰减的规律不明显，垂直向 Z 分量主振频率拟合精度较高，随距离增大频率衰减的规律明显，在爆破安全监测实践中应重点关注垂直向 Z 分量主振频率的衰减变化。

3) 考虑高程效应或水体波动效应的修正公式相较于萨道夫斯基公式预测精度均有一定的提升，同时考虑高程效应和流体波动效应得修正公式预测精度最高，该修正公式能更准确反映水下钻孔爆破振动传播规律，且回归方程和回归系数显著。

参考文献:

[1] 中国工程爆破协会, 广东宏大爆破股份有限公司, 浙江省高能爆破工程有限公司, 等. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[2] 李新平, 边兴, 罗忆, 等. 地下洞室边墙爆破振动传播衰减规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2063-2069.

[3] 唐海, 李海波, 蒋鹏灿, 等. 地形地貌对爆破振动波传播的影响实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1817-1823.

[4] 唐海, 李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 820-824.

[5] 郑儒彬. 复杂环境下爆破振动速度预测模型分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 75-79, 90.

[6] 范勇, 裴勇, 杨广栋, 等. 基于改进 PSO-BP 神经网络的爆破振动速度峰值预测[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 194-203, 302.

[7] 彭亚雄, 吴立, 苏莹, 等. 考虑高程效应的水下爆破振动衰减拟合模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 173-178.

[8] 冯路, 于建新, 丁书学, 等. 两相近隧道竖井爆破振动监测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1314-1321.

[9] 胡刚, 吴云龙. 爆破地震振动控制的一种方法[J]. 煤炭技术, 2004, 23(4): 104-106.

[10] 张勤彬. 考虑高程及岩体损伤的爆破振动传播规律及其控制技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.

[11] 中国电力企业联合会. 水电水利工程爆破安全监测规程: DL/T 5333—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[12] 邵蔚, 王长柏. 水下爆破振动特征及衰减规律研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(5): 15-22.

(本文编辑 赵娟)



(上接 216 页)

2) 针对大型港口工程开山与边坡防护中常常遇到的边界处理、模型优化、数据贯通、信息深化与数据传递等问题, 采用软件优势与二次开发相结合的手段提出一套系统、规范的陆域形成中开山与边坡防护 BIM 设计应用方法, 弥补了大型港口工程中开山与边坡防护 BIM 设计应用的缺失, 为大型港口工程不同阶段的数字信息传递提供思路。

参考文献:

[1] 牟春波. 夯实经济社会数字化发展底座: 《“十四五”信息通信行业发展规划》新型数字基础设施篇章解读[J]. 中国电信业, 2021(12): 16-19.

[2] 角雪岭, 徐靖昕. 以宁波舟山港为核心打造世界级港口集群的对策建议[J]. 中国港口, 2018(4): 26-28.

[3] 刘长俭, 黄川, 钟鸣, 等. “十四五”长三角港口面临的政策机遇、需求特征和建设重点[J]. 水运工程, 2023(7): 7-12, 19.

[4] SHIROWZHAN S, SEPASGOZAR S M E, EDWARDS D J, et al. BIM compatibility and its differentiation with

interoperability challenges as an innovation factor [J]. Automation in construction, 2020, 112(4): 103086.

[5] HEIGERMOSER D, DE SOTO B G, ABBOTT E L S, et al. BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management [J]. Automation in construction, 2019, 104(8): 246-254.

[6] 倪寅. BIM 技术在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2018(4): 128-133, 166.

[7] 闫晓敏. Civil 3D 在港区工程量计算中的应用[J]. 海岸工程, 2019, 38(2): 115-123.

[8] 薛天寒, 金哲飞, 姚海元, 等. 基于 BIM+GIS 的港口空间规划及设计技术方法[J]. 水运工程, 2022(5): 159-163.

[9] 范文彰, 徐传超, 陆晶晶. 基于 BIM 技术的装配式高桩码头设计计算一体化研究[J]. 水运工程, 2023(5): 172-177.

[10] 王世坚, 陆晶晶. 装配式桩基码头构件制造与加工数字化技术[J]. 水运工程, 2023(5): 182-186.

[11] 陆晶晶. 数字化交付在装配式桩基码头全生命周期建设中的应用[J]. 水运工程, 2023(5): 167-171, 186.

(本文编辑 王传瑜)