

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.005

## 水下深埋岩石爆破振动衰减规律研究

费鸿禄,孙晓宇,关福晨,刘雨

(辽宁工程技术大学 爆破技术研究院,阜新 123000)

**摘要:** 由于传统振动速度预测公式未考虑水体对爆破振动传播的影响,为了提高水下爆破质点振速的预测精度,基于量纲分析理论,考虑爆破振动速度监测点与爆源之间的地形(高程差和水平距离)影响因素,同时引入海水深度影响因子,构建水下深埋岩石爆破质点峰值振动速度公式。采用多元非线性回归分析方法,结合厦门海底隧道爆破现场试验实测数据进行质点峰值振动速度预测并分别与萨氏公式及一个萨氏修正公式的预测结果进行了对比分析。研究表明:水下爆破质点峰值振动速度预测平均相对误差分别为20.20%、6.98%、7.50%;当水深变化不明显时,量纲理论推导出的振速公式与高程振速公式对质点峰值振动速度预测精度基本一致。基于量纲理论推导的公式预测施工过程中保护对象的安全距离及爆破药量,可以指导海底爆破安全施工。

**关键词:** 水下钻孔爆破;质点峰值振动速度;量纲分析;衰减规律;安全距离

**中图分类号:** TV542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0026-08

## Vibration Attenuation Law of Underwater Deep Buried Rock Blasting

FEI Hong-lu, SUN Xiao-yu, GUAN Fu-chen, LIU Yu

(Institute of Blasting Technique, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The influence of water on blasting vibration propagation is not considered in the traditional prediction formula of blasting vibration peak particle velocity. In order to improve the prediction accuracy of underwater blasting vibration peak particle velocity, the formula of peak particle velocity of blasting vibration in underwater deep buried rock was constructed based on the dimension analysis theory, which considered the influence factors of topography (elevation difference and horizontal distance) between the monitoring point and the blasting center, and the influence factor of seawater depth. Combining with the measured data of Xiamen submarine tunnel blasting field test, the peak particle velocity was predicted by using multivariate non-linear regression analysis method. The predicting work was taken by new formula, Sadovsk's formula and a modified Sadovsk's formula, the average relative error was 20.20%, 6.98%, 7.50% accordingly. When the depth of water was not changed obviously, the vibration velocity formula derived from the dimensional theory and the elevation vibration velocity formula were basically consistent with the prediction accuracy of the peak particle velocity of the particle. The formula derived from the dimensional theory predicts the safety distance and the amount of explosives in the construction process, which can guide the safe construction of submarine blasting.

**Key words:** underwater bored blasting; peak particle velocity; dimensional analysis; attenuation law; safe distance

收稿日期:2020-04-10

作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授、博士生导师,主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作,(E-mail) feihonglu@163.com。

通讯作者:孙晓宇(1994-),女,硕士研究生,主要从事岩土工程和爆破工程方面的研究,(E-mail) sunxiaoyu9405@163.com。

近年来,我国地铁、公路、铁路建设蓬勃发展,沿海、沿江城市的地下交通工程建设,大部分都面临跨江、跨海问题。随着隧道盾构法技术的日益成熟,复合地层条件下的盾构法施工技术已得到广泛使

用<sup>[1,2]</sup>。但在某些水下施工过程中,存在覆盖软土层的球状风化岩体和基岩局部侵入隧道开挖断面的情况,针对该特殊地质条件,一般采用垂直钻孔形式对侵入岩体进行水下爆破预处理,使岩体均匀破碎,改善上软下硬的复合地质条件,保护盾构机高效安全施工<sup>[3]</sup>。水下深埋岩石爆破与陆域爆破和存在临空面的水下爆破不同,由于被爆岩体上有一定厚度的覆盖层,导致被爆岩体没有临空面,使爆破地震波衰减速度降低,振动强度增大<sup>[4]</sup>,因此无临空面的水下爆破振动影响不可忽视。

针对爆破振动衰减规律,国内外学者进行了大量研究,C González-Nicieza 等认为爆破地震波迅速衰减与节理面的存在有关,指出地形、地质条件对爆破振动频率的影响显著<sup>[5]</sup>;周俊汝等基于弹性波动理论,借助动力有限元算法,研究竖向钻孔爆破激发的振动波频率衰减特征<sup>[6]</sup>;高启栋等对水平光面爆破激发的地震波采用极化偏振分析方法,研究不同波的衰减特征及各自对爆破振动的影响<sup>[7]</sup>;李志文等考虑爆破地震波传播过程中波阵面的几何扩散和介质吸收作用,研究爆破振动传播与黏性系数、时频的关系<sup>[8]</sup>;李继业等研究岩体重力荷载和爆破振动荷载的共同作用下,节理边坡岩体的爆破振动衰减规律<sup>[9]</sup>。上述研究针对陆域范围内爆破振动衰减规律问题进行深入分析,但水下爆破振动衰减规律由于水体的存在与陆域爆破不同。S Temkin 等根据小药量水下爆破实验,建立非线性压力脉冲传播模型<sup>[10]</sup>;邵蔚等通过引入水深比修正传统萨道夫斯基公式,对水下爆破振动衰减规律进行分析<sup>[11]</sup>。李春军等采用数值模拟的方式,分析不同水深和填塞长度对钻孔爆破冲击波压力峰值的影响<sup>[12]</sup>。陈坤鑫等应用模拟软件,得到一定深度水下水击波压力峰值衰减公式<sup>[13]</sup>。以上水下爆破研究大都集中在水下爆破冲击波压力变化规律上,对水下爆破振动衰减规律描述较少,且水下地质条件复杂,影响爆破振动速度变化物理量多,所以适合水下场地条件的爆破振动变化规律的研究是进行水下工程爆破设计、预测的重要依据。实践证明,运用量纲分析理论推导的振速衰减公式是适用的<sup>[14,15]</sup>。

因此,以福建省厦门市轨道交通 3 号线海底隧道爆破工程为背景,结合现场勘查资料和试验实测数据,采用量纲分析的方法并进行无量纲化,构建水下深埋岩石爆破质点峰值振动速度公式,得到水下深埋岩石爆破质点峰值振动速度衰减的一般规律。利用量纲理论推导出的振速公式分析水下爆破施工过程中保护对象的安全距离及爆破药量,为水下爆

破灾害的有效控制提供依据。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

福建省厦门市轨道交通 3 号线工程海底隧道段位于厦门本岛东北部,连接厦门本岛湖里区和翔安区,左线长度 1415.218 m,右线长度 1419.928 m,全线长 6500 m。跨海段为五缘湾站~刘五店站,海城段全长 1100 m,位于同安湾口海域,海底平坦,为侵蚀堆积地貌。地层土质主要为粗砂、圆砾、风化花岗岩闪长岩,单线硬岩段长度约 600 m,隧道洞身范围内基岩(单轴抗压强度最大值为 220 MPa)凸起较为明显,随机分布大小不一的孤石(单轴抗压强度 80~140 MPa)。施工段隧道采用泥水盾构与爆破施工方法相结合的形式,即提前对隧道洞身内的基岩和孤石进行爆破,解决施工范围内岩体软硬不均问题,避免产生掘进方向偏离轴线以及盾构机磨损等不利影响。见图 1。

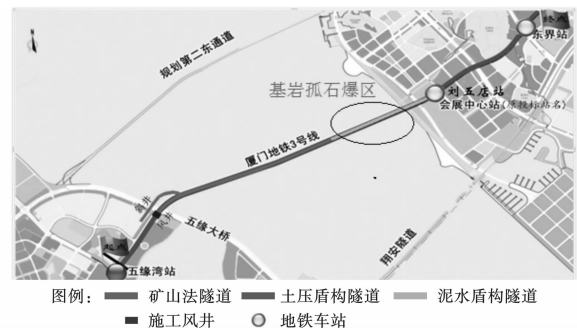


图 1 厦门本岛至翔安过海通道施工平面  
Fig. 1 Xiamen island to xiang'an channel tunnel construction plane

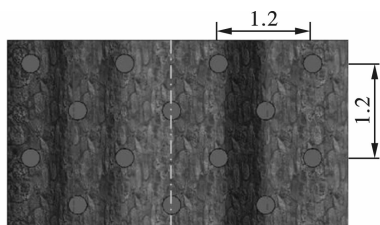
### 1.2 爆破参数

隧道爆破施工采用水胶炸药、非电导爆管毫秒雷管,炮孔直径为 146 mm,孔间排距为 1.2 m×1.2 m,采用梅花形布孔方式。药卷长度 500 mm,直径 100 mm,每卷 4 kg,炸药参数如表 1 所示,雷管段别分别为 Ms3、Ms5,对应单段药量分别为 36 kg、60 kg。为了避免爆破欠挖导致存在欠炸岩坎,盾构开挖断面外设置超炸岩石,开挖上断面岩石超炸范围为 1.0 m,开挖下断面岩石超炸范围为 2.0 m。施工水平剖面、垂直剖面区间炮孔布置如图 2、图 3 所示。

表 1 水胶炸药性能参数

Table 1 Parameters of water gel explosive

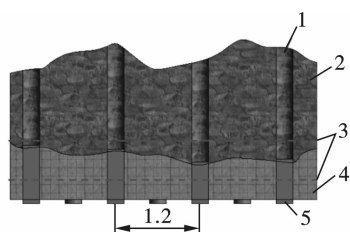
炸药密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	殉爆距离/ cm	爆速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	猛度/ mm	作功能力/ mL
1.06 ~ 1.15	$\geq 3$	$\geq 5.0 \times 10^3$	$\geq 15$	$\geq 310$



建筑限界 隧道中心线 建筑限界

图2 水平剖面(单位:m)

Fig. 2 Horizontal section(unit:m)



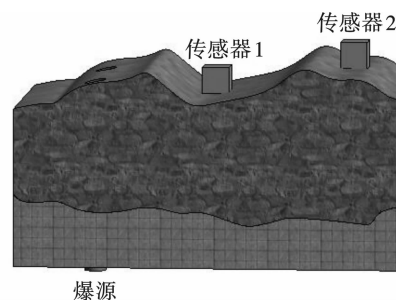
1-炮孔 2-覆盖层 3-建筑限界 4-基岩 5-装药段

图3 垂直剖面(单位:m)

Fig. 3 Longitudinal section(unit:m)

### 1.3 监测方案

本次爆破采用2台TC-4850测振仪及配套的三向传感器,将测振仪器放置于海底隧道覆盖层表面,两台测振传感器间距为20 m,测量范围为距爆源50~100 m,测点布置方案如图4所示。由于海水冲击对振动传感器存在径向和切向扰动,水平方向振动速度变化响应不可靠。因此,关于水下爆破所引发的振动强度以垂向振速为主<sup>[16]</sup>,试验所测得数据如表2所示。



爆源

图4 监测点布置

Fig. 4 Monitoring points arrangement

表2 试验数据

Table 2 Experimental data

单段最大药量 $Q/\text{kg}$	距爆心水平距离 $L/\text{m}$	覆盖层厚度 $H/\text{m}$	海水深度 $h/\text{m}$	爆心距 $R/\text{m}$	Z轴峰值振速 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	雷管段别
36	50	31.8	16.5	59.26	4.53	3
60	50	31.8	16.5	59.26	7.72	5
36	50	29.6	15.8	58.10	4.56	3
60	50	29.6	15.8	58.10	9.34	5
36	60	32.4	16.3	68.19	3.80	3
60	60	32.4	16.3	68.19	7.76	5
36	60	33.7	17.2	68.82	3.07	3
60	60	33.7	17.2	68.82	5.89	5
36	70	35.8	15.6	78.62	2.56	3
60	70	35.8	15.6	78.62	4.38	5
36	70	32.0	14.4	76.97	2.74	3
60	70	32.0	14.4	76.97	5.23	5
36	80	29.6	13.9	85.30	2.89	3
60	80	29.6	13.9	85.30	5.50	5
36	80	27.8	12.6	84.69	3.67	3
60	80	27.8	12.6	84.69	5.89	5
60	90	30.7	13.1	95.09	4.61	5
36	90	28.3	14.6	94.34	2.67	3
60	90	28.3	14.6	94.34	4.31	5
36	100	31.5	15.8	104.84	2.06	3
60	100	31.5	15.8	104.84	4.23	5

## 2 工程验证分析

### 2.1 基于萨道夫斯基公式预测分析

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

式中: $v$  为爆破质点振动速度,  $\text{cm/s}$ ;  $Q$  为单段最大药量,  $\text{kg}$ ;  $R$  为测点到药包中心的距离,  $\text{m}$ ;  $k$  为与爆破场地条件有关的参数;  $\alpha$  为爆破质点振动速度衰减系数。

根据专家学者的研究<sup>[17]</sup>, 非线性的拟合精度高于线性拟合, 令  $p = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$  则公式(1)可变为

$$v = k \cdot p^\alpha \quad (2)$$

将萨道夫斯基公式进行非线性回归分析, 得出  $\alpha = 1.70$ 、 $k = 803$ 、相关系数  $R = 0.69$ , 回归结果如图 5 所示, 则式(1)为

$$v = 803 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.70} \quad (3)$$

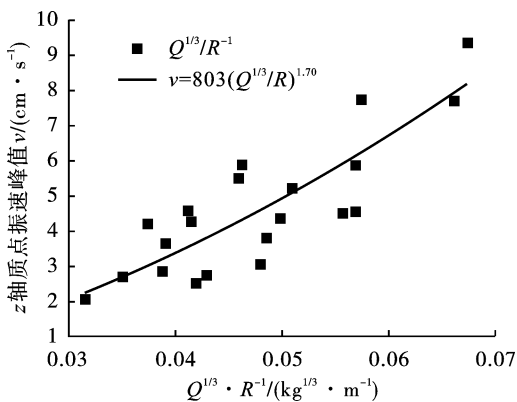


图 5 式(3)Z轴回归分析

Fig. 5 Formula(3) Z-axis regression analysis

### 2.2 基于高程振速公式预测分析

基于爆破相似率与类比法<sup>[18]</sup>, 引入高程比例药量  $\rho = \frac{Q^{1/3}}{H}$  及高程差因子  $\beta$  得到修正后的高程振速公式, 如式(4)所示<sup>[19]</sup>

$$v = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{L} \right)^\alpha \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (4)$$

式中: $H$  为测点与爆心的高程差,  $\text{m}$ ;  $L$  为监测点距爆心水平距离,  $\text{m}$ ;  $\beta$  为高程差因子, 其余符号意义与公式(1)一致。

将高程振速公式进行非线性回归分析, 得出  $k = 12\ 351$ 、 $\alpha = 1.20$ 、 $\beta = 2.05$ 、相关系数  $R = 0.93$ , 回归结果如图 6 所示, 则式(4)为

$$v = 12\ 351 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{L} \right)^{1.20} \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^{2.05} \quad (5)$$

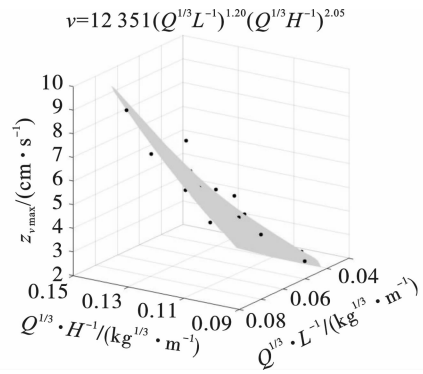


图 6 式(5)Z轴回归分析

Fig. 6 Formula(5) Z-axis regression analysis

### 2.3 基于量纲分析法的新建振速公式预测分析

假设覆盖层岩石力学性质相同, 类比陆域专家学者的研究成果<sup>[20,21]</sup>, 爆破地震波在水下深埋岩石内传播主要受到爆破过程中单段最大药量、爆心距、爆破工艺参数、爆区地质条件、纵波波速、爆源与测点之间的高程差(覆盖层厚度)及水深作用的影响, 因此选择介质中纵波传播波速  $C_p$ 、单段最大药量  $Q$ 、监测点距药包中心水平距离  $L$ 、海水深度  $h$ 、覆盖层厚度  $H$ 、药包半径  $R_0$  作为主要引起爆破峰值振动速度变化的物理量。

根据白金汉定理<sup>[22]</sup>, 取单段最大药量  $Q[M]$ 、介质中纵波传播波速  $C_p[LT^{-1}]$ 、监测点距药包中心距离  $L[L]$  为独立量纲,  $v$  为因变量, 其余为自变量, 则有

$$\begin{aligned} \pi &= L^\alpha Q^\beta C_p^\gamma v \\ \pi_1 &= L^{\alpha_1} Q^{\beta_1} C_p^{\gamma_1} H \\ \pi_2 &= L^{\alpha_2} Q^{\beta_2} C_p^{\gamma_2} h \\ \pi_3 &= L^{\alpha_3} Q^{\beta_3} C_p^{\gamma_3} R_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\gamma_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\gamma_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\beta_3$ 、 $\gamma_3$  为待定系数。

根据量纲齐次性原理对其待定指数求解<sup>[23]</sup>, 可得

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{v}{C_p} \\ \pi_1 &= \frac{H}{L} \\ \pi_2 &= \frac{h}{L} \\ \pi_3 &= \frac{R_0}{L} \end{aligned} \quad (7)$$

相似标准方程可写成

$$\pi = \phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) \quad (8)$$

即

$$v = C_p \phi \left( \frac{v}{C_p}, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \frac{R_0}{L} \right) \quad (9)$$

同种类别炸药,装药量和装药半径存在三次方函数关系式<sup>[24]</sup>,即

$$\sqrt[3]{Q} \approx R_0 \quad (10)$$

根据白金汉定理,可知不同无因次量的乘积和商比运算仍为无因次量,对  $\pi_1$ 、 $\pi_2$  进行如下运算

$$\pi_{12} = \pi_2 \times \pi_1 = \frac{Hh}{L^2} \text{代入式(9)则}$$

$$v = C_p \phi\left(\frac{Hh}{L^2}, \frac{R_0}{L}\right) \quad (11)$$

通常情况下对于某一具体工程场地  $C_p$  可以近似为常数,因此式(11)可以改写成

$$v = k\left(\frac{Q^{1/3}}{L}\right)^\alpha \left(\frac{Hh}{L^2}\right)^\beta \quad (12)$$

式中: $k$  为与爆破场地条件有关的参数; $\alpha$ 、 $\beta$  为爆破质点振动速度衰减系数。

将新建公式进行非线性回归分析,得出  $k = 9108$ 、 $\alpha = 3.36$ 、 $\beta = -0.98$ 、相关系数  $R = 0.93$ ,回归

结果如图 7 所示,则式(12)为

$$v = 9108\left(\frac{Q^{1/3}}{L}\right)^{3.36} \left(\frac{Hh}{L^2}\right)^{-0.98} \quad (13)$$

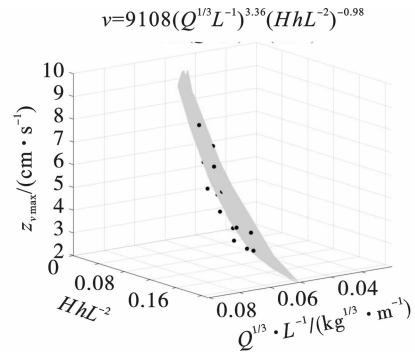


图 7 式(13)Z轴回归分析

Fig. 7 Formula(13)Z-axis regression analysis

### 2.4 相对误差分析

将测点振速的现场试验结果同式(3)、式(5)和式(13)的推算值进行对比,如表 3 所示。

表 3 实测振速与预测振速对比误差分析

Table 3 Analysis of contrast error between actual vibration velocity and predicted vibration velocity

Z 轴振动 速度 $v_{max}/$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	公式(3)		公式(5)		公式(13)	
	预测振动 速度 $v_{max}/$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	相对 误差/%	预测振动 速度 $v_{max}/$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	相对 误差/%	预测振动 速度 $v_{max}/$ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	相对 误差/%
4.53	5.93	30.91	4.56	0.66	4.55	0.44
7.72	7.92	2.59	7.93	2.72	8.07	4.53
4.56	6.13	34.43	5.28	15.79	5.10	11.84
9.34	8.19	12.31	9.19	1.61	9.03	3.32
3.80	4.67	22.89	3.53	7.11	3.51	7.63
7.76	6.24	19.59	6.13	21.01	6.21	19.97
3.07	4.60	49.84	3.25	5.86	3.20	4.23
5.89	6.14	4.24	5.66	3.90	5.67	3.74
2.56	3.67	43.36	2.39	6.64	2.67	4.30
4.38	4.90	11.87	4.15	5.25	4.74	8.22
2.74	3.80	38.69	3.01	9.85	3.23	17.88
5.23	5.08	2.87	5.23	0.00	5.72	9.37
2.89	3.19	10.38	3.00	3.81	2.99	3.46
5.50	4.26	22.55	5.23	4.91	5.30	3.64
3.67	3.23	11.99	3.42	6.81	3.50	4.63
5.89	4.32	26.66	5.94	0.85	6.21	5.43
4.61	3.54	23.21	4.21	8.68	4.60	0.22
2.67	2.69	0.75	2.86	7.12	2.53	5.24
4.31	3.59	16.71	4.97	15.31	4.48	3.94
2.06	2.25	9.22	2.02	1.94	1.82	11.65
4.23	3.00	29.08	3.52	16.78	3.22	23.88

注:相对误差 =  $\left| \frac{\text{实测值} - \text{预测值}}{\text{实测值}} \right|$

由表 3 中数据可以看出,  $Z$  轴振速峰值为 7.72 cm/s、7.76 cm/s、2.67 cm/s 三组数据,式(5)与式(13)预测振速误差比式(3)分别大 0.13%、1.94%、1.42%、0.38%、6.37%、4.49%, $Z$  轴振速峰值为 5.23 cm/s、2.06 cm/s 两组数据,式(13)预测振速误差比式(3)大 6.50%和 2.43%,以上误差属于可接受范围内误差;存在  $Z$  轴振速峰值为 7.72 cm/s、9.34 cm/s、3.80 cm/s、4.38 cm/s、2.74 cm/s、5.23 cm/s、5.89 cm/s、2.06 cm/s、4.23 cm/s 的 9 组试验数据显示式(13)预测振速误差值大于式(5),但所偏差平均误差值仅为 5.1%。该现象产生的主要原因是:本次试验测试场地海水深度变化最大为 4.6 m,相邻两监测点之间海水深度变化均值约为 2 m,各测点之间可以考虑为等水深状态;式(13)与式(5)相比多考虑水深因素,且水

深变化不明显,由此产生干扰误差。

式(3)预测振速误差值分布在 0.75% ~ 49.84%之间,平均相对误差为 20.20%;式(5)预测振速误差值分布在 0.00% ~ 21.01%之间,平均相对误差为 6.98%;式(13)预测振速误差值分布在 0.22% ~ 23.88%之间,平均相对误差为 7.50%。式(13)与式(5)回归分析相关系数均为 0.93;式(13)比式(5)多考虑水深因素对爆破振动速度的影响;且式(13)平均相对误差仅比式(5)大 0.52%,综上所述式(13)可以较准确的预测水下爆破振速。

### 2.5 爆破振动分析

为探明爆破振动速度随测点至爆源的影响因素变化关系,依据式(13)绘制  $Z$  轴质点振速峰值与监测点距爆心水平距离、覆盖层厚度和海水深度的关系图像,如图 8 ~ 10 所示。

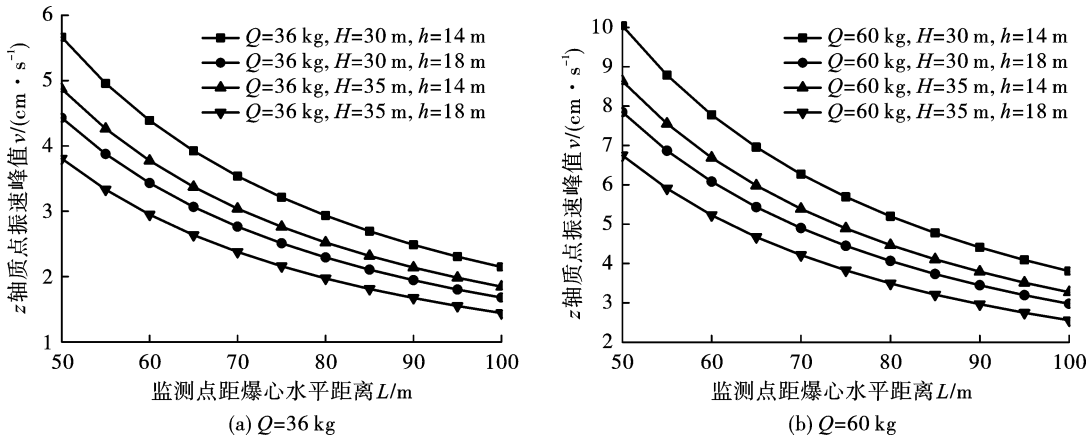


图 8 振速  $v$  与监测点距爆心水平距离  $L$  的关系

Fig. 8 Relation between vibration velocity  $v$  and horizontal distance  $L$  from monitoring point to explosion center

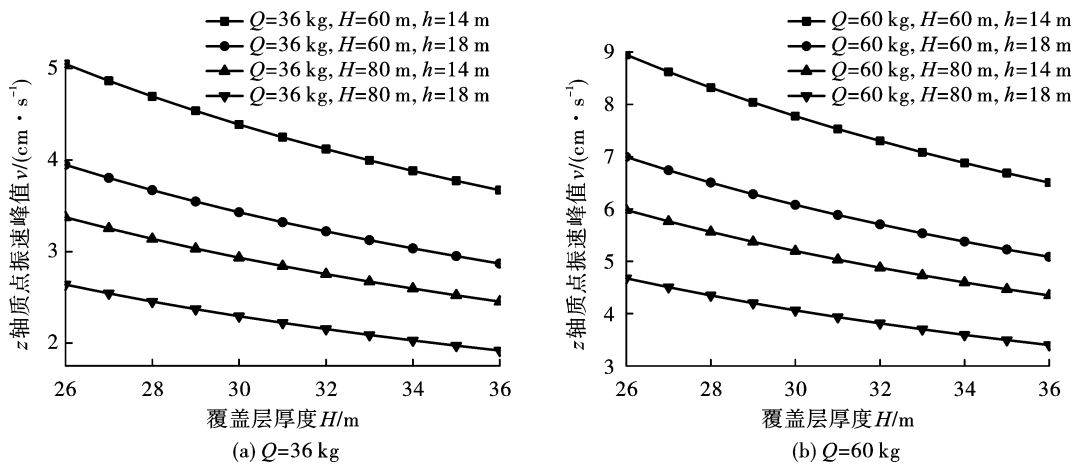


图 9 振速  $v$  与覆盖层厚度  $H$  的关系

Fig. 9 Relation between vibration velocity  $v$  and overburden thickness  $H$

由图 8 ~ 图 10 可见,当监测点距爆心水平距离、覆盖层厚度、海水深度等步距增加时,质点峰值

振动速度均呈现衰减趋势;针对单段最大药量  $Q$ 、监测点距爆心水平距离  $L$ 、覆盖层厚度  $H$  和海水深度

$h$ , 这四个影响因素中, 单段最大药量对质点振速峰值影响最明显; 当监测点距爆心水平距离与覆盖层厚度以相同增量增加时(增量为 5 m), 覆盖层厚度对质点振速峰值影响较为明显; 当监测点距爆心水平距离与单段最大药量不变时, 海水深度变化比覆盖层厚度变化对质点振动速度衰减程度更加显著。因此在同一单段最大药量下, 监测点距爆心水平距

离越远, 覆盖层越厚, 海水深度越大, 振动在传播过程中衰减的越快, 质点振速峰值越小。产生上述现象主要是由于水下爆破引发的振动在传播过程中遇到粘塑性体及粘塑性流体等共同组成介质层时发生衰减; 置于覆盖层上的振动监测传感器受到海水深度变化的压力影响, 对振动产生阻抗作用。

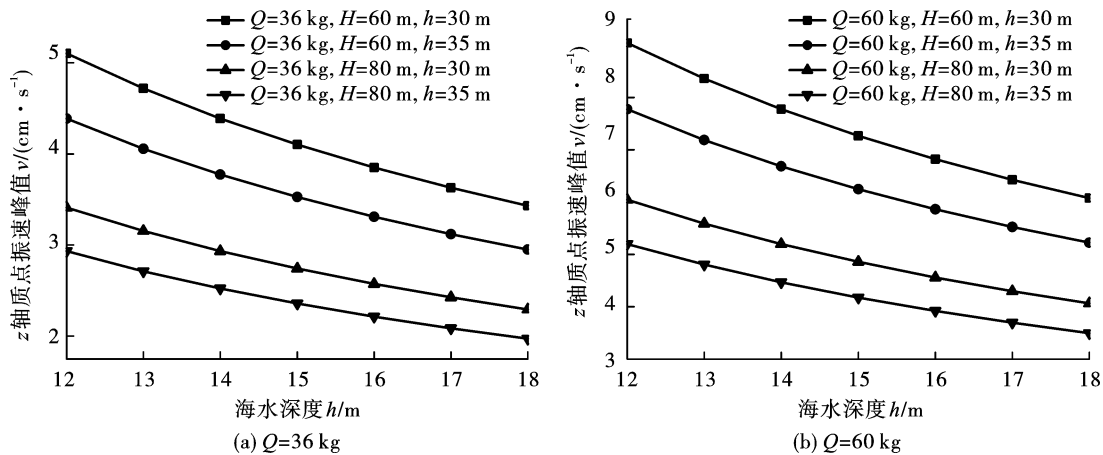


图 10 振速  $v$  与海水深度  $h$  的关系

Fig. 10 Relationship between vibration velocity  $v$  and seawater depth  $h$

由于水下深埋岩石爆破振动传播介质层复杂, 主要由淤泥层、粉质黏土层、细沙、风化岩石碎渣等从上至下逐渐堆积组合形成, 相关规程中依据萨氏经验公式总结的  $k$  值<sup>[25]</sup>, 主要依托于陆域爆破试验且振动传播为单一介质层, 因此式(5)、式(13)中  $k$  值偏离常规值。

### 3 爆破振动影响分析

五缘湾站~刘五店站区间爆破区域邻近翔安侧海堤, 与爆破区域最近距离为 700 m, 周边为厦门东海域, 无建筑物。由于本次施工采取爆破与水泥盾构相结合的方式, 爆破作业时盾构机已布置在海底, 为了避免爆破过程中产生地震波造成盾构刀盘与盾构机头胸板处发生变形, 导致盾构机的损伤, 因此依据对水下深埋岩石爆破质点振速峰值传播衰减规律分析, 应用式(13)确定爆破中心与盾构机之间的安全距离尤为重要。

根据《爆破安全规程》中的规定<sup>[25]</sup>, 本次工程对翔安侧海堤爆破振动安全速度为 5  $\text{cm/s}$ , 对水下盾构机爆破振动安全速度为 8  $\text{cm/s}$ 。厦门市轨道交通 3 号线本岛至翔安过海隧道工程, 覆盖层厚度 26.7~38.4 m, 海水深度 9.5~20.4 m, 根据式(13)考虑最不利情况下 ( $H=26.7$  m,  $h=9.5$  m,  $Q=60$  kg), 得出施工过程中盾构机距爆心的最小安全

距离应为 84 m; 海堤距爆心最小安全距离为 117 m 小于 700 m, 对海堤没有伤害, 安全距离与装药关系如表 4、表 5 所示。

表 4 单段最大药量与盾构机距离关系 ( $v=8$   $\text{cm/s}$ )

Table 4 The relationship between single maximum dosage and the distance of shield machine

安全距离/m	单段最大药量/kg	安全距离/m	单段最大药量/kg
80	56.72	110	84.45
90	65.71	120	94.15
100	74.96	130	104.06

表 5 单段最大药量与翔安海堤距离关系 ( $v=5$   $\text{cm/s}$ )

Table 5 The relationship between single maximum dosage and the distance of xiang'an seawall

安全距离/m	单段最大药量/kg	安全距离/m	单段最大药量/kg
110	55.50	140	75.03
120	61.88	150	81.79
130	68.39	160	88.66

### 4 结论

依托厦门市轨道交通 3 号线本岛至翔安海底隧道工程, 基于量纲分析理论, 构建水下深埋岩石爆破质点峰值振动速度公式。研究监测点距爆心水平距

离,覆盖层厚度、海水深度对质点峰值振动速度传播的影响以及估算施工过程中各保护对象的安全距离和爆破药量,得出结论如下:

(1)采用非线性回归分析法将实测峰值速度数据分别代入萨氏公式、高程振速公式以及新建振速公式进行非线性回归运算,得到水下爆破质点峰值振动速度预测平均相对误差分别为 20.20%、6.98%、7.50%,相关系数分别为 0.69、0.93、0.93,当水深变化不明显时,高程振速公式与无量纲理论推导出的振速公式对质点峰值振速预测精度基本一致。

(2)计算与现场监测数据均表明,爆破振动强度与单段最大药量、监测点距爆心水平距离、覆盖层厚度、海水深度等因素存在密切关系,在保证其它相关物理量不变的前提下,其对峰值振动速度影响关系为单段最大药量 > 海水深度 > 覆盖层厚度 > 监测点距爆心水平距离。同一单段最大药量下,振动在传播过程中衰减规律体现在,峰值振动速度与监测点距爆心水平距离,覆盖层厚度,海水深度均呈现负相关关系。

(3)利用新建振速公式预测五缘湾站~刘五店站区间海底爆破施工中各保护对象的最小安全距离及相应安全距离下的爆破药量,其中盾构机距离爆心的最小安全距离为 84 m;海堤距爆心最小安全距离为 117 m。

### 参考文献 (References)

- [1] BRUNETON, MARIANNE. Complex lithospheric structure under the central baltic shield from surface wave tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B10): B10303.
- [2] 洪开荣. 水下盾构隧道硬岩处理与对接技术[J]. *隧道建设*, 2012, 32(3): 361-365.
- [2] HONG Kai-rong. Case study on hard rock treatment technology and shield docking technology in boring of underwater tunnels [J]. *Tunnel Construction*, 2012, 32(3): 361-365. (in Chinese)
- [3] 阳军生, 邹志林, 梁奎生, 等. 高强度基岩爆破预处理泥水盾构掘进特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(6): 1179-1184.
- [3] YANG Jun-sheng, ZOU Zhi-lin, LIANG Kui-sheng, et al. Tunneling characteristics of high-strength bedrock stratum pretreated by blasting [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(6): 1179-1184. (in Chinese)
- [4] 池恩安, 赵明生, 梁开水, 等. 自由面数量对爆破地震波时频特性影响分析[J]. *爆破*, 2013, 30(2): 16-20.
- [4] CHI En-an, ZHAO Ming-sheng, LIANG Kai-shui, et al. Influence of number of free surface on time-frequency characteristics of blasting seismic Wave [J]. *Blasting*, 2013, 30(2): 16-20. (in Chinese)
- [5] C González-Nicieza C, ÁLVAREZ-FERNANDEZ, M I Alvarez-Vigil, A E, et al. Influence of depth and geological structure on the transmission of blast vibrations [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2014, 73(4): 1211-1223.
- [6] 周俊汝, 卢文波, 钟冬望, 等. 竖向钻孔爆破激发振动波频率的衰减特征[J]. *爆破*, 2019(1): 14-20.
- [6] ZHOU Jun-ru, LU Wen-bo, ZHONG Dong-wang, et al. Attenuation characteristics of vibration frequency induced by vertical borehole blasting [J]. *Blasting*, 2019(1): 14-20. (in Chinese)
- [7] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J/OL]. *爆炸与冲击*: 1-16 [2019-07-23].
- [7] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YANG Zhao-wei, et al. Components and attenuation characteristics of seismic waves induced by horizontal smooth blasting [J/OL]. *Explosion and Shock Waves*: 1-16 [2019-07-23]. (in Chinese)
- [8] 李志文, 李建春, 洪胜男, 等. 考虑黏性效应的爆破震动区的理论分析[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(17): 115-122.
- [8] LI Zhi-wen, LI Jian-chun, HONG Sheng-nan, et al. Theoretical analysis of blasting vibration zone considering viscous Effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(17): 115-122. (in Chinese)
- [9] 李继业, 蒲朝钦, 何兴贵. 节理岩体边坡爆破振动衰减特征分析[J]. *爆破*, 2018(2): 32-36.
- [9] LI Ji-ye, PU Chao-qin, HE Xing-gui. Analysis of blasting vibration attenuation characteristics of jointed rock mass slope [J]. *Blasting*, 2018(2): 32-36. (in Chinese)
- [10] S Temkin, G Z Ecker. Droplet pair interactions in a shock-wave flow field [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 202(202): 467-497.
- [11] 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): 19-26.
- [11] SHAO Wei, WANG Chang-bai. Study on vibration characteristics and attenuation law of under water blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(5): 19-26. (in Chinese)
- [12] 李春军, 吴立, 李红勇, 等. 水深和堵塞长度对水下钻孔爆破冲击波传播特性影响的模拟研究[J]. *爆破*, 2018, 35(4): 51-55, 77.
- [12] LI Chun-jun, WU Li, LI Hong-yong, et al. Effect of water depth and stemming length on shock wave propagation in underwater drilling blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(4): 51-55, 77. (in Chinese)