

海底隧道低振动、精细化爆破施工的控制技术研究^{*}

冀大禹

(中铁十八局集团第一工程有限公司, 072750, 涿州//高级工程师)

摘要 目的:海底隧道爆破施工产生的振动可能会对施工区域周边敏感建(构)筑物的安全有一定的影响,且爆破振动可能会超出周边居民可接受范围,需采用低振动、精细化的爆破控制技术,以尽可能减少爆破振动的影响。**方法:**以厦门某海底隧道工程爆破施工为背景,在阐述工程概况的基础上,介绍了对施工区域周边敏感建筑物进行爆破安全性评估的方法。基于工程实际,对低振动、精细化爆破控制施工关键技术进行了研究,阐述了该工程爆破控制施工的原理及流程,对爆破施工过程中的减振措施、开挖工法、数码电子雷管使用、自动化爆破监测等施工工艺的创新点进行了重点论述。**结果及结论:**所采取的低振动、精细化爆破控制技术能大幅降低爆破产生的振动,爆破速率大幅下降,减振效果好,且对周边建筑物的影响较小,实现了无感爆破和绿色环保施工的目标。

关键词 海底隧道;爆破控制技术;爆破安全性评估;爆破振动速率

中图分类号 U455.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.11.032

Research on Control Technology for Low Vibration and Fine Blasting Construction in Subsea Tunnel

Ji Dayu

Abstract **Objective:** The vibration generated by the blasting construction of subsea tunnel may have a certain impact on the safety of sensitive buildings (structures) in the vicinity of the construction area, and the blasting vibration may exceed the acceptable range of the surrounding residents. It is needed to use low vibration, fine blasting control technology to minimize the impact of blasting vibration. **Method:** Taking the blasting construction of a subsea tunnel project in Xiamen as a background, based on generating an overview of the project, the method of conducting safety assessment on sensitive buildings in the surrounding areas during the blasting construction process is introduced. According to the actual project, the key technology of low vibration and fine blasting control construction is

studied, the principle and process of blasting control construction of the project are elaborated. Innovative points such as vibration reduction measures, excavation methods, employment of digital electronic detonators, and automated blasting monitoring during the blasting construction process are emphasized. **Result & Conclusion:** The adopted low vibration and fine blasting control technology can significantly reduce the vibration generated by blasting, greatly reduce the blasting rate, achieve a good shock absorption effect, and have a relatively small impact on the surrounding buildings, thus achieving the goals of senseless blasting and green construction.

Key words subsea tunnel; blasting control technology; blasting security assessment; blasting vibration rate

Author's address China Railway No.18 Bureau Group No. 1 Engineering Co., Ltd., 072750, Zhuozhou, China

随着我国海底隧道交通的快速发展,如何快速、安全地进行隧道施工已成为重点关注的问题。尽管可采取的施工措施众多^[1],如增加炮眼数量、少装炸药、隔孔装药及采用普通非电毫秒雷管分段起爆等^[2],但隧道爆破作业仍难免会对周围建筑物产生振动危害。众多学者对爆破振动施工进行了研究^[3-5]。如何减少振动及爆破控制的振动速率(以下简称“振速”),是目前隧道爆破工程施工的技术难点^[6]。

本文以厦门某海底隧道爆破工程为背景,基于该工程采用的低振动、精细化爆破控制关键技术,对施工过程中安全风险防控、减振措施、开挖工法、炮眼布设、数码电子雷管使用及自动化爆破监测等方面进行了创新,总结了精细化爆破控制的成功经验,以期为类似工程隧道爆破开挖提供技术支撑及理论参考。

1 工程概况

图1为厦门市某海底隧道主线下穿城市主干道

^{*} 福建省交通运输科技项目(202106)

时与邻近建筑物周边环境位置关系图,其中,鸿图苑小区与右线隧道的距离仅 6 m。鸿图苑为 1994 年建成的七层砖混结构,地基采用桩基础。

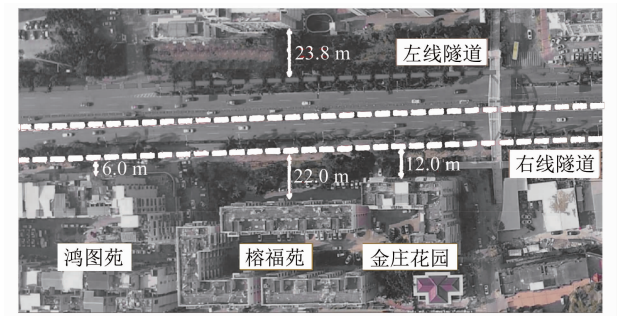


图 1 海底隧道主线与邻近建筑物周边环境位置关系图
Fig. 1 Diagram of the relationship between subsea tunnel mainline and the location of surrounding buildings environment

该海底隧道属浅埋暗挖隧道,施工段邻近老旧建筑物,爆破开挖等级为复杂环境城镇爆破 B 级。尤其是鸿图苑,该小区北面沿右线隧道段的爆破深度为 23~25 m,起爆点与房屋的最小水平距离仅为 6.0 m,因此,工程前期需对鸿图苑进行爆破安全性评估,并在此基础上提出有效的施工保护和控制措施。

2 工程周边环境的爆破安全性评估

2.1 爆破安全性评估方法

施工前,应先对邻近敏感建筑物进行安全性评估,以初步判定该建筑物可承受的爆破振速值及周边居民可接受的爆破振动感受范围。在前期非爆破控制施工期间对爆破监测点的数据进行了监测,得到爆破振速同起爆点与爆破监测点距离的关系如图 2 所示。由图 2 可知:起爆点与爆破监测点的距离从 124.99 m 减至 31.75 m 时,爆破振速由

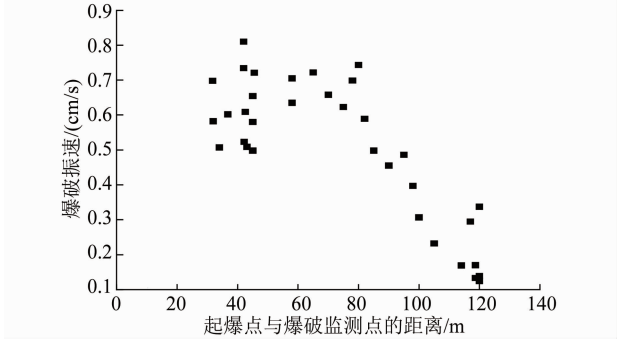


图 2 爆破振速同起爆点与爆破监测点距离的关系
Fig. 2 Relationship between the blast velocity and the initiation point-blast monitoring point distance

0.109 cm/s 增至 0.698 cm/s,此时的爆破振速已超过了周边居民可接受的爆破振动感受范围。

2.2 爆破振动强度预测

开挖爆破时,决定爆破振动强度的因素有很多,其主要影响因素是炸药量和爆心距。采用 M. A. 萨道夫斯基的振动最大速度经验公式来预测爆破振动强度,其计算式为:

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

$$Q = R^3 \left(\frac{v}{K} \right)^{3/\alpha} \tag{2}$$

式中:

- v ——地面质点峰值振速;
- Q ——炸药量,延时爆破时取最大段的炸药量;
- R ——爆破点与爆破监测点的距离;
- K ——场地系数;
- α ——衰减系数。

该海底隧道地处质地坚硬的中风化花岗岩内,根据工程经验,选用 $K=150.000$ 、 $\alpha=1.500$ 。鸿图苑属一般民用建筑物,根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》的规定,其控制振速为 2.0 cm/s。鸿图苑的桩基为大体积混凝土结构,设计中控制振速验算取抗震龄期最长的最小值(7.0 cm/s)的一半,即 3.5 cm/s 进行计算。选取 5 个爆破监测点,基于式(1)和式(2)对最大段的起爆药量进行核算,其结果如表 1 所示。由表 1 可知:前期爆破施工中,实测振速值小于计算振速值。

表 1 鸿图苑附近前期爆破施工时的爆破振动数据
Tab. 1 Blasting vibration data during previous blasting works near Hongtu Court

测点序号	水平距离/m	测点距地面的高差/m	斜距/m	最大段药量/kg	实测振速值/(cm/s)	计算振速值/(cm/s)	实测振速值与计算振速值的比值
1	34.0	23	41.0	7.2	0.524	1.533	0.34
2	32.5	23	39.8	5.4	0.781	1.388	0.56
3	31.0	23	38.6	12.6	0.838	2.220	0.38
4	29.5	23	37.4	10.8	0.884	2.155	0.41
5	28.0	23	36.2	6.0	0.527	1.687	0.31

注:水平距离指爆破监测点与鸿图苑小区的水平距离。

式(1)两边取对数,可得:

$$\lg v = \lg K + \alpha \lg \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right) \tag{3}$$

设 $y = \lg v$, $k = \lg K$, $x = \lg \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)$, 则式(2)可等

效于:

$$y = k + \alpha x \tag{4}$$

由最小二乘法可得线性回归方程 $y = 1.265\ 8x + 1.822\ 7$, 由此可知本工程地质与地形条件下的 $K = 66.481$ 、 $\alpha = 1.266$ 。经对比分析可得出结论:本次线性回归计算所得的 K 值和 α 值是合理的。

当取 $K = 66.481$ 、 $\alpha = 1.266$ 时, 根据式 (2) 对左线隧道和右线隧道最大段的爆药量进行核算。结合爆破工程的安全风险评估要求, 对鸿图苑小区的房屋进行逐层、逐户排查, 并监测爆破数据。由此得到鸿图苑小区房屋安全性评估的预测结果为: 该小区房屋主体结构安全、可控。

3 低振动、精细化爆破控制施工的关键技术

由上文可知, 0.698 cm/s 的爆破振速引起的振动已超过了周边居民可接受范围, 且考虑到施工区域周边建筑物老旧, 该工程采用低振动、精细化的爆破控制技术, 以尽可能减少爆破振动的影响。

3.1 爆破控制施工原理

结合施工区域围岩地层的具体情况, 本文选择上台阶 CD (中隔壁) 法进行开挖, 采取上台阶左右导洞分步实施、左右导洞内设超前导洞 (先掏心再压顶)、超前中管棚减振、设减振孔、周边眼加密、电子雷管单孔单响、爆破控制进尺、控制单孔装药量等施工工艺。

此外, 该工程还采用了自动化监测手段, 做到一炮一测、一炮一总结。在周边建筑布设传感器, 用以收集监测数据。爆破测试先在试验段内实施, 在分析爆破控制效果和不断优化爆破参数后, 确定一个安全且居民可接受的爆破振速值。施工时, 应严格按照要求实施爆破作业。

3.2 爆破施工进度

该海底隧道低振动、精细化的爆破施工进度如图 3 所示。

4 爆破控制的施工工艺

通过大量调研与方案研究, 本工程确定采用上台阶 CD 法开挖、左右线导洞分步实施、导洞内设超前导洞、先掏心再压顶、创造临空面等爆破控制施工方法。具体的施工工艺如下:

1) 在离敏感建筑物距离相对较远的区段设试验段, 先在试验段内开展爆破控制测试, 以模拟邻近敏感建筑物的爆破反应。对采集得到的试验段数

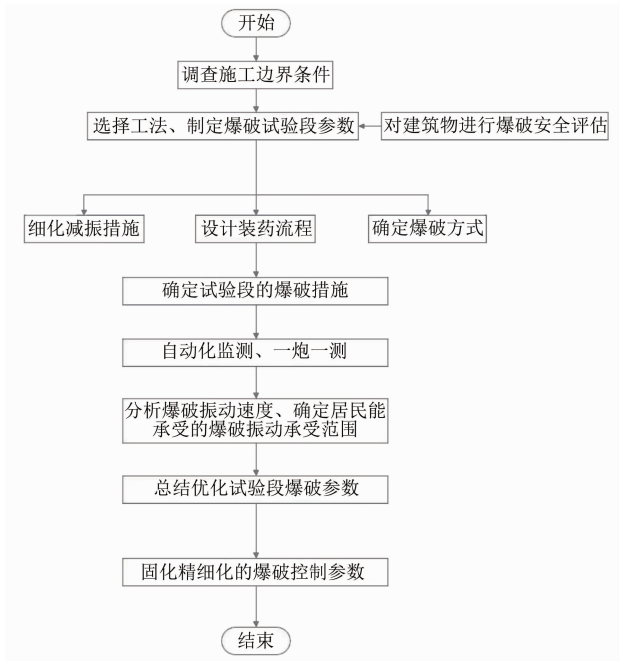


图 3 海底隧道低振动、精细化爆破施工进度
Fig. 3 Low vibration, fine blasting construction process in subsea tunnel

据进行分析, 在通过敏感建筑物的安全性评估后进一步改进爆破工艺及其参数。随后再开始其他区段的施工。

2) 采用上台阶 CD 法开挖, 其支护参数分别为: ①在隧道拱部设长为 120 cm 、间距为 60 cm 的中空注浆锚杆; ②在仰拱处设 $\varphi 8$ 钢筋网, 网格大小为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$; ③在仰拱处设 20b 工字钢 (间距为 60 cm); ④在仰拱处设 50 cm 厚的 C50 钢筋混凝土二次衬砌; ⑤在仰拱处设 28 cm 厚的 C25 喷射混凝土; ⑥在仰拱处设 20b 工字钢 (间距 60 cm); ⑦在仰拱处浇筑 55 cm 厚的 C50 钢筋混凝土。

3) 上台阶 CD 法临时支撑采用 $I20\text{b}$ 工字钢 (间距为 60 cm), 设置 22 cm 喷射混凝土; 上台阶左右导洞分步实施, 左右导洞内分别设置 4.5 m (宽) \times 3.5 m (高) 的城门洞超前导洞, 并在其中部设置 2 排 $\phi 100\text{ mm}$ 的中空减振孔。减振孔的层距为 0.3 m , 排距为 0.5 m , 孔深与管棚长度一致。

4) 开挖前打设 $\phi 76\text{ mm}$ (间距为 6.0 mm)、长度为 13.2 m 的中管棚, 其环向间距为 40 cm , 空管不注浆, 并兼顾超前支护和减振要求; 在周边眼内侧的辅助眼位置上打设 8 个 $\phi 90\text{ mm}$ (间距为 1.1 m) 的减振孔。在上台阶 CD 法竖撑位置打设 6 个 $\phi 90\text{ mm}$ (间距为 1.0 m) 的减振孔, 其孔深均与管棚长度一致。

5) 周边眼间距 ≤ 40 cm;电子雷管单孔单响;爆破控制进尺措施为超前导洞连续进 2 次,再一次性压顶,总进尺 ≤ 4 榧钢架间距;单孔爆药量 ≤ 1.2 kg;严格按一炮一测要求实施爆破。

为模拟邻近敏感建筑物的爆破反应,在隧道左右侧 6 m 沿隧道方向布置自动化爆破监测点,如图 4 所示,监测点间距为 10 m,左右侧均布置 4 个监测点,用以采集试验段监测点的爆破振速数据。

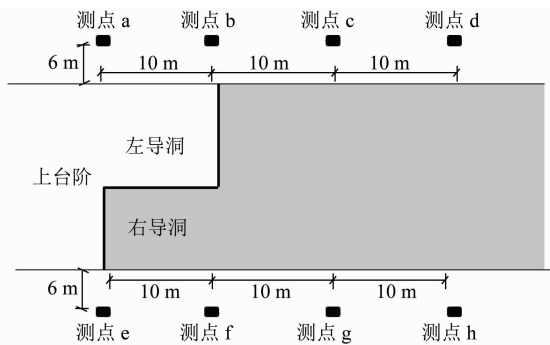


图 4 隧道左右侧自动化爆破监测点布置图

Fig. 4 Layout diagram of automated blasting monitoring points on the left and right sides of the tunnel

图 5 为对左线导洞掏心-压顶爆破振速监测 67 次、对右线导洞掏心-压顶爆破振速监测 50 次后得到的监测点爆破振速。为了清晰地看出左右线导

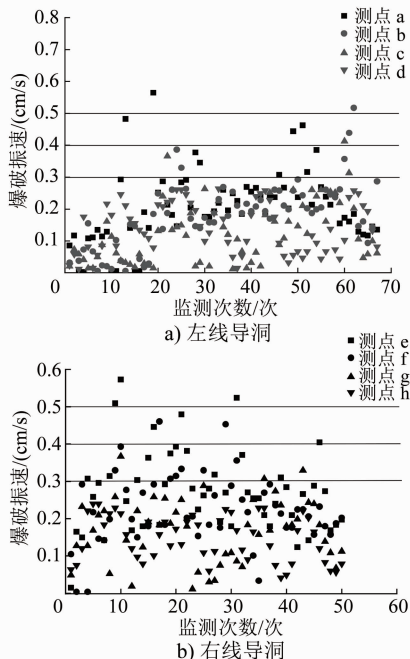


图 5 左右线导洞内各监测点的爆破振速实测值

Fig. 5 Measured blasting velocity value at different types of monitoring points in the left and right line guide holes

洞监测点爆破振速的分布,绘制了 3 条横线,将爆破振速区分开来。由图 5 可知:左线导洞约 94% 的监测点的爆破振速在 0.3 cm/s 以下,远小于 GB 6722—2014 的规定值(2.0 cm/s);右线导洞约 86% 的监测点的爆破振速在 0.3 cm/s 以下,远小于 2.0 cm/s。因此,本文所述的隧道低振动、精细化爆破控制技术能大幅度降低爆破产生的振动,爆破速率大幅下降,减振效果良好,且对周边建筑物的影响较小。

5 结语

本工程基于厦门某海底隧道的爆破施工项目,对工程周边敏感建筑物采取的低振动、精细化爆破控制施工关键技术进行了研究,并结合爆破振动实测数据对爆破控制效果进行了分析,结论如下:

1) 本工程对邻近敏感建筑物硬岩段采用了上台阶 CD 法开挖、上台阶左右导洞分步实施、左右导洞内设超前导洞、超前中管棚减振、设减振孔、周边眼加密、电子雷管单孔单响、爆破控制进尺、控制单孔装药量等施工措施。经实验验证,这些施工措施能大幅降低了爆破振速,极大地减少对邻近建(构)筑物的损伤及对周边居民的影响,实现了无感爆破和绿色环保施工。

2) 本工程减少了对周边围岩的损伤,光面爆破质量和爆破后围岩的自承能力得以进一步提高,这既减少了隧道拱顶局部围岩掉块的可能性,也提升了隧道开挖操作环境的安全性。采取缩短电子雷管延期时间、在底板孔设双雷管等措施后,该工程施工中减少了盲炮数量,降低了电子雷管拒爆率,提高了雷管的安全使用度。

参考文献

- [1] 方俊波,刘洪震,翟进营. 山岭隧道爆破施工技术的发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1980.
FANG Junbo, LIU Hongzhen, ZHAI Jinying. Development and prospect of blasting technology for mountain-crossing tunnels[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1980.
- [2] 樊祥喜,曹保山,单仁亮,等. 隧道爆破引起路基边坡振动信号的规律研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 127.
FAN Xiangxi, CAO Baoshan, SHAN Renliang, et al. On the law of roadbed slope vibration caused by tunnel blasting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 127.
- [3] 罗志翔,张敏超,钟祖良. 空间交叉隧道爆破施工对邻近隧道结构影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 1): 205.

(下转第 180 页)

基坑开挖过程中围护结构的变形规律,进而为工程施工选择合理的支护方案提供依据。

参考文献

- [1] 汪丽,张军平.基于BIM的深基坑安全监测信息系统设计与实现研究[J].机械设计与制造工程,2018,47(12):91.
WANG Li, ZHANG Junping. Design and implementation of deep foundation pit safety monitoring information system based on BIM[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(12): 91.
- [2] 吴清平,时伟,戚铎钟,等.超大深基坑BIM施工全过程模拟与分析研究[J].工程建设,2013,45(5):20.
WU Qingping, SHI Wei, QI Huazhong, et al. The whole process BIM simulation and analysis research of extra large deep foundation pit construction[J]. Engineering Construction, 2013, 45(5): 20.
- [3] 石云轩.基于BIM的基坑多维可视化监测方法探索与实践[J].土木建筑工程信息技术,2017,9(2):55.
SHI Yunxuan. Research and practice of multi-dimensional visualization monitoring technology of foundation pit based on BIM[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2017, 9(2): 55.
- [4] 段龙飞.多层内支撑深基坑施工BIM技术应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.

DUAN Longfei. Study on the BIM technology applied to the construction process of deep foundation pit with multi-layered inner supports[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

- [5] 刘素军,李强,杨猛,等.BIM技术在深基坑监测数据处理中的应用[J].建筑技术,2018,49(10):1049.
LIU Sujun, LI Qiang, YANG Meng, et al. Application of BIM technology in data processing of deep foundation pit monitoring[J]. Architecture Technology, 2018, 49(10): 1049.
- [6] 谭佩,陈立朝,周龙翔.BIM技术在深基坑施工中的应用[J].广州大学学报(自然科学版),2016,15(1):64.
TAN Pei, CHEN Lichao, ZHOU Longxiang. Application of BIM in deep foundation pit construction[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2016, 15(1): 64.
- [7] 何建军,王硕,姚守俨.基坑工程BIM应用[J].土木建筑工程信息技术,2016,8(6):55.
HE Jianjun, WANG Shuo, YAO Shouyan. BIM application in the foundation pit engineering[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2016, 8(6): 55.
- [8] 肖贝.Revit二次开发在基坑土方工程中的应用研究[D].南昌:南昌大学,2016.
XIAO Bei. Application reaserch of autodesk Revit redevelopment in earthwork calculation of excavation engineering[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.

(收稿日期:2023-04-23)

(上接第175页)

- LUO Zhixiang, ZHANG Minchao, ZHONG Zuliang. Study on the influence of blasting construction of space cross tunnel on adjacent tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 205.
- [4] 樵平,张维明,卜俊锐,等.复杂地质条件下高边坡爆破控制技术[J].爆破,2017,34(3):74.
QIAO Ping, ZHANG Weiming, BU Junrui, et al. Control blasting technique of high slope in complex geological conditions[J]. Blasting, 2017, 34(3): 74.
- [5] 于丽,路明,王明年,等.基于改进灰色关联度法对超小净距交叉隧道爆破施工研究[J].现代隧道技术,2021,58(增

刊1):336.

- YU Li, LU Ming, WANG Mingnian, et al. Study on blasting construction of super-closely-spaced cross tunnel based on improved grey relational analysis[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(S1): 336.
- [6] 王崑,白琦瑞.卡洛特水电站溢洪道梯段爆破控制设计[J].人民长江,2018,49(增刊2):142.
WANG Wei, BAI Qirui. Control design of bench blasting of Karot Hydropower Station spillway[J]. Yangtze River, 2018, 49(S2): 142.

(收稿日期:2022-11-29)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

