

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.010

海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的 精细化爆破预处理方法研究*

魏海霞¹, 崔有权¹, 陈建福², 杨小林¹, 褚怀保¹, 祝杰¹, 陈士海³

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454003; 2. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250000;
3. 华侨大学 土木工程学院, 厦门 361021)

摘要: 海域盾构施工中常遇到大粒径孤石和基岩凸起段, 通常采用爆破法进行预处理, 爆破预处理的效果是盾构机顺利通过的关键。依托厦门轨道交通2号线工程, 综合考虑海域孤石和基岩凸起段的覆盖层条件、爆破块度控制指标及海洋生物安全控制标准, 提出了一种盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化爆破预处理方法。具体步骤包括: 爆破孔网参数设计; 炸药单耗、单孔装药量、平均块度尺寸的计算; 装药结构及爆破网路设计; 爆破块度分布效果预测; 考虑生态环境影响进一步优化爆破方案。现场应用结果表明: 爆破预处理后的块度在30 cm以内, 满足盾构机推进的块度尺寸要求; 盾构机在爆破预处理段能够顺利掘进, 与正常段推进参数基本相近。实现了海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化、生态化、高效化和安全化爆破施工。

关键词: 海域盾构; 孤石; 基岩凸起段; 爆破预处理; 块度

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)01-0081-08

A Refined Blasting Pretreatment Method for Boulders and Bedrock Traversed by Shield Tunnels in Sea Area

WEI Hai-xia¹, CUI You-quan¹, CHEN Jian-fu², YANG xiao-lin¹, CHU Huai-bao¹, ZHU Jie¹, CHEN Shi-hai³

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250000, China;

3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In constructing shield tunnels in a sea area, large-sized boulders and bedrock are often encountered, necessitating pretreatment via blasting. The effectiveness of blasting pretreatment is crucial for the regular excavation of shield machines. Based on Xiamen Metro Line 2 project, a refined blasting pretreatment method for boulders and bedrock in shield tunnels under the sea area is proposed. The method comprehensively considers overburden conditions, blasting fragmentation indexes, and marine biological safety standards. Specific steps include designing blasting parameters, calculating powder factor, determining single-hole charges and average block size, designing charge structures and initiation networks, predicting the distribution of blasting fragments, and optimizing the blasting program to minimize ecological impact. Field application results indicate that post-blasting fragment sizes are within 30 cm, meet-

收稿日期 (Date of reception): 2024-05-12

网络首发日期 (Published online): 2024-07-20

作者简介: 魏海霞 (1982-), 女, 博士、副教授, 主要从事爆炸理论及应用研究, (E-mail) whx19820828@163.com。

通讯作者: 崔有权 (1996-), 男, 硕士生, 主要从事地下与隧道工程技术研究, (E-mail) 1684010048@qq.com。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC2907200)

About the author: WEI Hai-xia (1982-), female, Ph. D, associate professor, mainly engaged in research on explosion theory and application, (E-mail) whx19820828@163.com.

Corresponding author: CUI You-quan (1996-), male, master degree candidate, mainly engaged in research on underground and tunnel engineering technology, (E-mail) 1684010048@qq.com.

Fund Programs: National Key Research and Development Program of China (2023YFC2907200)

ing the size requirements for the shield machine. The shield machine could excavate smoothly through the blasting pretreatment section, with excavation parameters similar to those in regular sections. The proposed method achieved a refined, ecological, efficient and safe blasting construction in the sea section containing boulders and bedrock.

Key words: shield machines in the sea area; boulders; bedrock; blasting pretreatment; fragments

随着我国地下空间开发利用步伐的不断加快,盾构施工作为隧道、地铁、市政管线、越江、跨海等基础设施建设的一种主要方法得到了广泛的应用^[1]。在中国东南部沿海城市的复杂地层中,厦门、福州、广州等地,都不同程度地存在孤石和基岩局部侵入隧道开挖断面的情况^[2],若不对其进行预处理,盾构直接掘进将会使刀盘刀具磨损严重,产生施工进度缓慢,费用高等问题。针对孤石和基岩入侵情况,提前进行预处理是最好的选择。目前提前预处理的办法有人工挖孔、冲击破碎、旋挖钻取芯等,而对比各种处理技术的效果、安全、经济及对周边环境的影响,爆破技术则更有优势^[3]。

不少学者结合实际工程开展了孤石和基岩凸起段不同爆破预处理方法的应用研究,取得不错的爆破预处理效果。欧玉峰等提出了导爆管雷管孔外接力控制起爆技术并应用于基坑开挖项目大片区孤石处理^[4],成功实现了一次性安全、可靠的起爆。许贵华将聚能装药技术运用到地铁盾构掘进过程遭遇的孤石处理中^[5],发现在装药量减少的条件下,通过聚能装药起爆后产生的聚能效应仍能提高岩石的破碎效果。沈顺平等采用水下深孔爆破预处理海底盾构隧道内孤石、基岩的复合地层^[6],改善了岩石破碎效果和盾构掘进效率。梁奎生等对海底取水隧道存在的孤石群和基岩凸起^[7],采用地面垂直钻孔进行了无自由面爆破预处理,确保了盾构顺利通过。丁悦等采用地表钻孔地下爆破的方法对侵入盾构隧道的不同基岩厚度选择不同的炮孔间距及装药量并对基岩预处理效果进行了验证^[8],结果表明基岩破碎效果良好。卢少壮等采用地质钻机钻孔和深孔爆破的方式进行了滨海沉积地区孤石地层的处理^[9],

处理效果良好。

爆破预处理的效果是盾构机顺利通过的关键。现有的孤石和基岩凸起段爆破参数一般借鉴露天台阶爆破设计方法或同类工程经验进行确定,对于海域盾构隧道孤石和基岩凸起段爆破预处理缺少理论指导依据,没有考虑海域孤石的覆盖层具体条件和块度粒径的细化控制指标,容易造成爆破后岩石块度过大,导致爆破预处理达不到预期效果,同时增加了二次破碎成本。另外,现有的海域爆破预处理方法鲜少考虑水下爆破冲击波对海域生态环境的影响,导致水下爆破作业引发的中华白海豚及其他海洋哺乳动物和鱼类的死亡事件时有发生。本文依托厦门轨道交通2号线工程,综合考虑海域孤石和基岩凸起段的覆盖层具体条件、爆破块度粒径的细化控制指标及海洋生物安全控制标准,提出一种同时考虑爆破破岩块度效果和海域生态环境影响的精细化爆破预处理方法,对实现海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化、生态化、高效化和安全化爆破施工具有重要意义,可为海域同类工程施工提供借鉴和指导。

1 工程概况

1.1 工程简介

厦门地铁2号线跨海隧道(起讫里程右DK18+531.484~DK21+267.569)自海沧大道站起,至东渡路站。区间隧道采用盾构法+矿山法施工,盾构法隧道采用圆形断面,开挖直径7.03 m。盾构区间采用“点”钻探“线”物探综合勘探,发现地层地质情况复杂多变,堪称“地质博物馆”,海上段加密补勘段(海沧侧海堤~大兔岛)主要为中等、微风化的花岗岩和中等、微风化的安山岩,地层分布如图1所示。

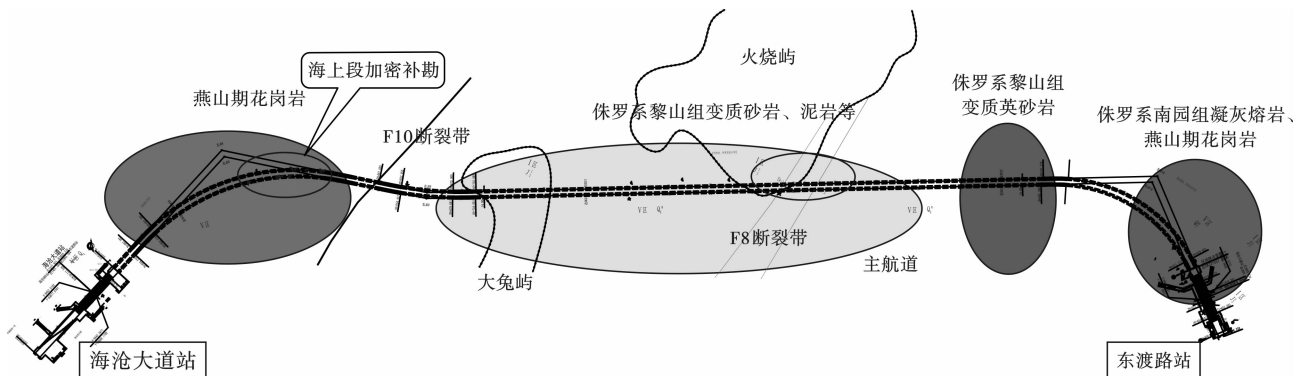


图1 海域盾构隧道地层平面分布图

Fig. 1 Planar distribution of the strata where the shield tunnel is located in the sea area

1.2 孤石及基岩的探测与分布

海上段已完成海沧侧海堤~大兔屿段(左线 DK18+907.11~DK19+151.84、右线 DK18+897~

DK19+121.73)地质加密补勘,沿左右线线路中心线 5 m 一个补勘孔进行地质取芯,共发现孤石 8 处,基岩凸起 5 处。部分分布情况如表 1 所示。

表 1 孤石和基岩凸起段完成工作量
Table 1 Workload of boulders and bedrock

| 序号 | 钻孔编号 | 面积/m ² | 厚度/m | 体积/m ³ | 埋深/m | 与隧道关系 | 岩性 | 备注 |
|----|-------------------|-------------------|------|-------------------|------|-------------|--------------|----|
| 1 | T4-30 | 4.15 | 1.2 | 5.02 | 16.7 | 位于隧道内 | 18-5 微风化安山岩 | 孤石 |
| 2 | T4-36 | 4.66 | 3.2 | 14.77 | 10.8 | 位于隧道内 | 17-4 中等风化花岗岩 | |
| 3 | T4-49 | 8.43 | 2.2 | 18.55 | 18.6 | 位于隧道内 | 17-4 中等风化花岗岩 | |
| 4 | M2Z3-THD-B48 | 9.69 | 4.9 | 47.19 | 11.7 | 位于隧道内 | 17-4 中等风化花岗岩 | |
| 5 | DK19+042~DK19+048 | 2.42 | 4.0 | 68.05 | 17.1 | 侵入断面 2.42 m | 18-5 微风化安山岩 | 基岩 |
| 6 | DK19+110~DK19+117 | 0.45 | 2.0 | 6.33 | 18.7 | 侵入断面 0.45 m | 18-5 微风化安山岩 | |
| 7 | DK19+038~DK19+045 | 2.35 | 5.7 | 94.17 | 16.5 | 侵入断面 2.35 m | 17-5 中等风化花岗岩 | |

2 海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化爆破预处理方法

针对现有海域孤石和基岩凸起段爆破预处理技术的不足,根据海域环境和工程特点,在此提出了一种考虑生态环境影响的海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化爆破预处理方法,该方法的具体步骤采用流程图的方式表示,如图 2 所示。

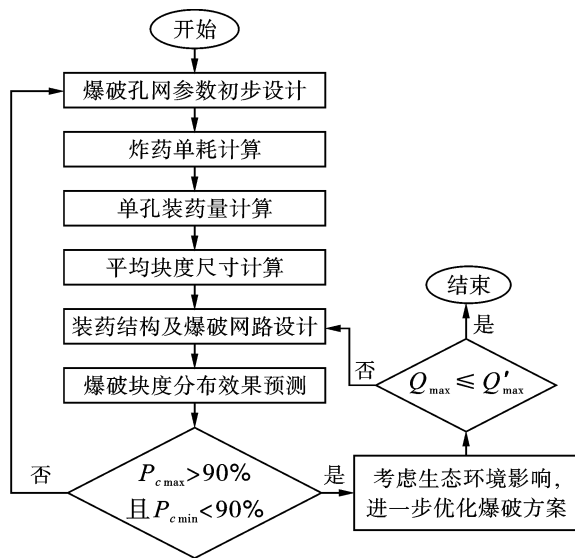


图 2 孤石和基岩凸起段的精细化爆破预处理方法流程图

Fig. 2 Flow chart of refined blasting pretreatment method for boulders and bedrock

2.1 爆破孔网参数初步设计

根据规范规定及前勘探测资料^[10],采用地质钻机对揭露的孤石和侵入隧道的基岩凸起段进行垂直钻孔,采用 ϕ 130 mm 钢套管, ϕ 108 mm 钻头和 ϕ 146 mm 钢套管, ϕ 130 mm 钻头,一般钻至底部(部分侵入隧道断面外的可适当超深 1~2 m)。成

孔后,将 90 mm PVC 管和 125 mm PVC 管埋设至设计深度。沿隧道轴线方向采用梅花形交错形式布置炮孔,边缘孔距同侧边缘的距离 b_0 取 0.5~0.8 m。孔间距 a 和孔排距 b 取值如下:

(1) 孤石爆破:当孤石厚度小于 2 m 时, a 、 b 均取 0.7~0.8;当孤石厚度大于 2 m 小于 3 m 时, a 、 b 均取 0.8~1.0;当孤石厚度大于 3 m 时, a 、 b 均取 1.0~1.2。

(2) 基岩凸起段爆破:当基岩厚度小于 2 m 时, a 、 b 均取 0.8~1.0,当基岩厚度大于 2 m 时, a 、 b 均取 1.0~1.5 m。

2.2 炸药单耗计算

在海域进行爆破作业时,为了尽量扩大“爆腔”、“粉碎区”、“裂纹区”,其炸药单耗 q 要大于陆地爆破的炸药单耗。参照文献[11],考虑海域中孤石和基岩凸起段的水压深度、软土覆盖层厚度及岩石厚度等具体爆破环境条件,提出如下的炸药单耗计算公式

$$q = k_1 q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (1)$$

式中: q 为水下钻孔爆破炸药单耗量,kg/m³; q_1 为无覆盖层条件下陆域爆破炸药单耗; k_1 为 q_1 的系数; q_2 为爆区上方水压增量, $q_2 = 0.01h_2$, h_2 为爆区上方水压等效深度; q_3 为爆区上方软土覆盖层增量, $q_3 = 0.02h_3$, h_3 为爆区上方软土覆盖层等效厚度; q_4 为孤石和基岩凸起段的膨胀增量, $q_4 = 0.03h_4$, h_4 为孤石和基岩凸起段的等效厚度。

本工程中孤石和基岩凸起段的覆盖层厚度在 15~25 m 之间,且爆破对象在水下,取 k_1 为 0.65,其余参数取值及炸药单耗的计算结果如表 2 所示。

2.3 单孔装药量计算

每个炮孔的单孔装药量 Q_i 由以下公式计算

$$Q_i = qab h_{4i} \quad (2)$$

式中: Q_i 为孤石和基岩凸起段第 i 个炮孔的单孔装药量, kg; 对于首先起爆的边缘孔, $b = b_0$; h_{4i} 为

第 i 个炮孔位置处孤石和基岩凸起段的厚度, m。

孤石和基岩凸起段的参数选取和单孔装药量的计算结果如表 2 所示。

表 2 孤石和基岩凸起段爆破平均块度尺寸的计算结果

Table 2 Calculation results of the average sizes of the fragments from boulder and bedrock blasting

| 序号 | a/m | b/m | b_0/m | q_1 | q_2 | q_3 | q_4 | $q/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | $Q_{0\max}$ | $Q_{1\max}$ | A | E | 边缘孔 X_{50}/cm | 边缘孔 X_{50}/cm | 备注 |
|----|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|---|-------------|-------------|-----|-----|---------------------------|---------------------------|----|
| 1 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 2.34 | 0.06 | 0.34 | 0.04 | 2.78 | 1.35 | 2.15 | 10 | 110 | 4.771 | 5.159 | 孤石 |
| 2 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 2.34 | 0.08 | 0.29 | 0.10 | 2.80 | 6.65 | 8.88 | 10 | 110 | 6.188 | 6.493 | |
| 3 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 2.34 | 0.02 | 0.32 | 0.07 | 2.75 | 3.08 | 3.87 | 10 | 110 | 5.526 | 5.741 | |
| 4 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 2.34 | 0.05 | 0.25 | 0.15 | 2.79 | 10.41 | 13.58 | 10 | 110 | 6.694 | 6.996 | |
| 5 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 2.34 | 0.05 | 0.34 | 0.07 | 2.80 | 11.18 | 15.24 | 10 | 110 | 6.752 | 7.109 | 基岩 |
| 6 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.34 | 0.08 | 0.35 | 0.01 | 2.78 | 1.00 | 1.80 | 10 | 110 | 4.540 | 5.008 | |
| 7 | 1.5 | 1.5 | 1.2 | 2.34 | 0.06 | 0.31 | 0.07 | 2.78 | 10.77 | 14.72 | 10 | 110 | 6.740 | 7.100 | |

2.4 平均块度尺寸计算

在计算孤石和基岩凸起段的平均块度尺寸时, 分别计算边缘孔、其它孔的最大单孔装药量, 记为 $Q_{0\max}$ 和 $Q_{1\max}$ 。最大单孔装药量边缘孔、其它孔对应爆破块度的平均尺寸 X_{50} 由 Cunningham 修正的 Kuznetsov 方程计算^[12]

$$X_{50} = Aq^{-0.8} Q^{1/6} (115/E)^{19/30} \quad (3)$$

式中: X_{50} 为爆破块度的平均粒径, cm; A 为岩石系数, 可参考取值^[13]; Q 为每孔装药量, kg; 对于边缘孔 $Q = Q_{0\max}$, 对于其它孔 $Q = Q_{1\max}$; E 为相对重量爆炸能量, 铵油炸药 $E = 100$, 水胶炸药 $E = 110$, TNT 炸药 $E = 115$ 。

考虑盾构机的排渣要求, 孤石和基岩凸起段爆破后块度最大尺寸控制值 $X_{\max} = 30\text{cm}$, 平均块度尺寸的计算结果如表 2 所示。

2.5 装药结构及爆破网路设计

(1) 装药结构

采用特制的圆形塑料筒装药柱, 孤石和基岩凸起段处药柱直径为 $d = 60\text{mm}$ 和 $d = 100\text{mm}$, 爆破的孔内雷管选用工业电子雷管, 炸药选用高密度 ($\rho_0 = 1100\text{kg/m}^3$)、高性能抗水乳化炸药。每个炮孔的装药段长度按照下式进行计算

$$L_i = \frac{4Q_i}{\pi d^2 \rho_0} \quad (4)$$

式中: Q_i 为孤石和基岩凸起段爆破的第 i 个炮孔的单孔装药量, kg; d 为装药直径, mm; ρ_0 为炸药密度, kg/m^3 。

对每个炮孔处的孤石和基岩凸起段厚度进行分类: (1) 厚度在 2 m 以下的, 采用轴向集中装药; (2)

厚度在 2 m 以上的, 采用轴向间隔装药。装药结构如图 3 和图 4 所示。

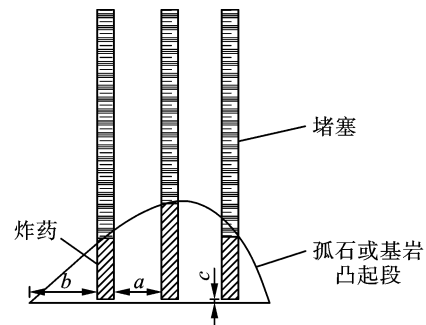


图 3 厚度 2 m 以下孤石或基岩凸起段

Fig. 3 Boulder or bedrock with a thickness of less than 2 m

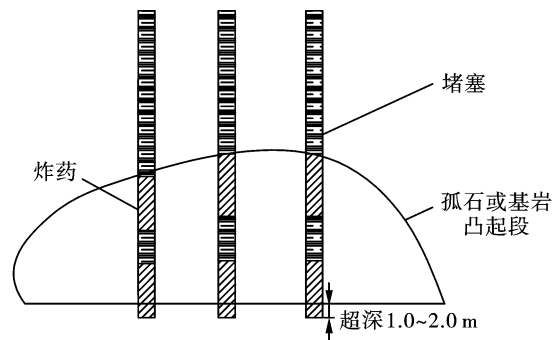


图 4 厚度 2 m 以上孤石或基岩凸起段

Fig. 4 Boulder or bedrock with a thickness of more than 2 m

(2) 爆破网路设计

爆破网路采用工业电子雷管逐孔起爆网路, 孔间延期时间为 25 ~ 50 ms。首先对孤石和基岩凸起段的边缘孔进行爆破, 利用边缘孔爆破产生的能量挤压周围土层而产生新的自由面, 然后对其它孔进行爆破。

2.6 爆破块度计算模型及预测结果

2.6.1 计算模型

Ouchterlony 等通过将 Kuz-Ram 模型中的 R-R 分布函数替换为 Swebrec 函数^[14],提高了对大颗粒的预测能力,并将此模型称为 Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony(KCO)模型。Swebrec 函数与 Kuz-Ram 模型中 Rosin-Rammler 方程一样,仍使用 X_{50} 的 50% 作为中心参数,但增加了 X_{max} 的最大极限值,参数 b 则是定义曲线波动的参数,表达式如下^[15]

$$P_x = \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{X_{max}}{X}\right)}{\ln\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right)} \right]^b} \quad (5)$$

$$b = \left[2 \ln 2 \ln\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right) \right] n \quad (6)$$

式中: P_x 为通过 x 尺寸筛网的块度累积含量;

X_{max} 为孤石爆破的块度最大尺寸控制值,无明确控制值时取所用盾构刀盘开口平均宽度的一半; b 为波动参数; n 为均匀性指数。

对均匀性指数 n ,由 Cunningham 通过现场试验提出的方程进行计算^[16]

$$n = \left(2.2 - 14 \frac{B}{d} \right) \left(1 - \frac{W}{B} \right) \left[\frac{1 + (m - 1)}{2} \right] \frac{L}{H} \quad (7)$$

式中: B 为最小抵抗线, m ; W 为钻孔精度标准差, m ; m 为炮孔密集系数; L 为实际装药长度, m ; H 为梯段台阶高度, m 。

2.6.2 预测结果

每块孤石和基岩凸起段的最大单孔装药量边缘孔、其它孔,采用 KCO 模型中 Swebrec 三参数分布模型。孤石和基岩凸起段均匀性指数相关参数的选取及计算结果如表 3 所示。

表 3 孤石和基岩凸起段均匀性指数计算结果

Table 3 Calculation results of uniformity indexes of boulders and bedrock

| 序号 | 边缘 B | 其它 B | 边缘 d/mm | 其它 d/mm | 边缘 W | 其它 W | 边缘 m | 其它 m | 边缘 H/m | 其它 H/m | 边缘 b | 其它 b | 边缘 n | 其它 n |
|----|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.6 | 0.8 | 60 | 60 | 0.05 | 0.06 | 1 | 1 | 1.01 | 1.21 | 2.5 | 2.6 | 0.96 | 1.06 |
| 2 | 0.8 | 1.0 | 60 | 60 | 0.15 | 0.16 | 1 | 1 | 2.97 | 3.17 | 2.6 | 3.2 | 1.18 | 1.49 |
| 3 | 0.7 | 0.8 | 60 | 60 | 0.10 | 0.11 | 1 | 1 | 2.00 | 2.20 | 2.2 | 2.3 | 0.95 | 0.98 |
| 4 | 0.8 | 1.0 | 60 | 60 | 0.23 | 0.24 | 1 | 1 | 4.67 | 4.87 | 2.1 | 2.7 | 1.02 | 1.33 |
| 5 | 1.2 | 1.5 | 100 | 100 | 0.11 | 0.12 | 1 | 1 | 2.22 | 2.42 | 2.2 | 2.7 | 1.08 | 1.33 |
| 6 | 1.2 | 1.2 | 100 | 100 | 0.01 | 0.02 | 1 | 1 | 0.25 | 0.45 | 2.6 | 2.4 | 0.98 | 0.97 |
| 7 | 1.2 | 1.5 | 100 | 100 | 0.11 | 0.12 | 1 | 1 | 2.15 | 2.35 | 2.2 | 2.7 | 1.07 | 1.33 |

利用 KCO 模型绘制的孤石边缘孔、其它孔爆破后块度累计曲线如图 5 所示。孤石区域边缘孔、其它孔爆破后 20 cm 以下的碎片占 94% 以上,1 cm 以下的块度占 20% 以下,块度尺寸大部分集中在 7 cm 左右,相对于大块度的孤石,主要集中在 8~9 cm 之间。基岩边缘孔、其它孔爆破后块度累计曲线如图 6 所示,基岩区域边缘孔、其它孔爆破后 20 cm 以下的块度占 95% 以上,1 cm 以下的块度占 20% 以下,块度尺寸大部分集中在 8~9 cm 左右,相对于大块度的基岩,主要集中在 10 cm 左右。故孤石和基岩凸起段块度分布均达到了比较好的爆破效果。

在爆破块度尺寸分布模型中,分别求解孤石和基岩凸起段最大单孔装药量边缘孔、其它孔块度尺寸 $x = 0.8X_{max}$ 对应的块度累计含量,取二者的较小值,记为 $P_{c max}$;块度尺寸 $x = 0.01X_{max}$ 对应的块度累计含量,取两者的较大值,记为 $P_{c min}$ 。孤石和基岩凸起段 $P_{c max}$ 、 $P_{c min}$ 计算结果如图 7 和图 8 所示。

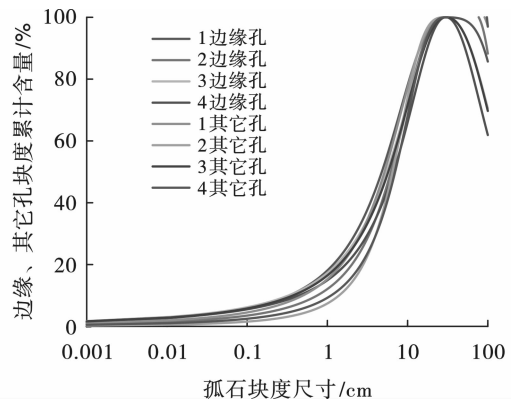


图 5 孤石边缘、其它孔块度累计曲线
Fig. 5 Accumulation curves of edge and other holes of boulders

由图 7 和图 8 可知,孤石和基岩凸起段区域 $P_{c max} > 90\%$ 且 $P_{c min} < 10\%$,说明较大爆破块度占比低,有利于提升盾构推进速度;另外微小爆破块度占

比低,炸药能量利用率高。故爆破效果良好,孔网参数设计可行。

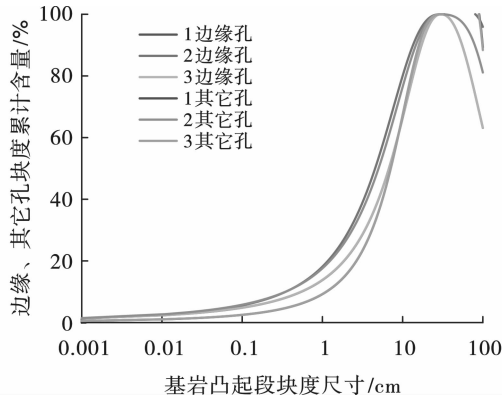


图6 基岩凸起段边缘、其它孔块度累计曲线

Fig. 6 Accumulation curves of edge and other holes of bedrock

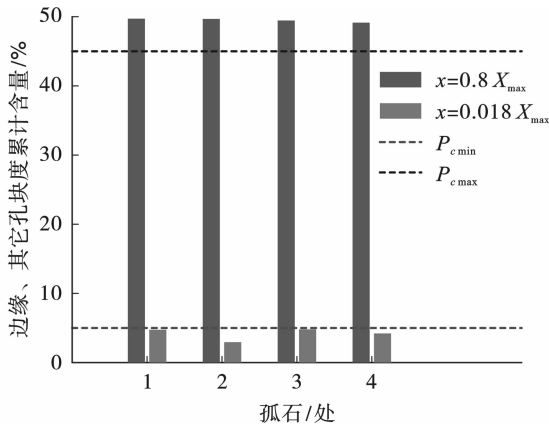


图7 孤石 $P_{c \max}$ 、 $P_{c \min}$ 计算结果

Fig. 7 Calculated $P_{c \max}$ and $P_{c \min}$ for boulders

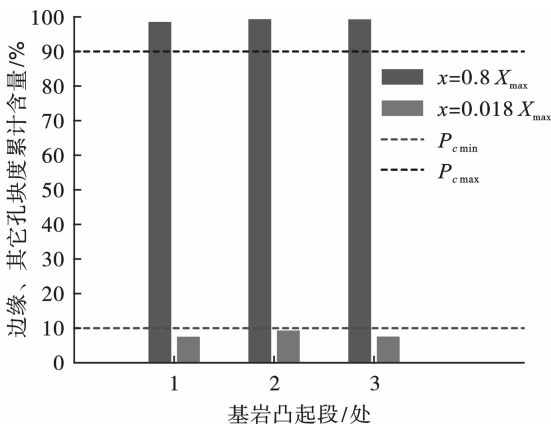


图8 基岩凸起段 $P_{c \max}$ 、 $P_{c \min}$ 计算结果

Fig. 8 Calculated $P_{c \max}$ and $P_{c \min}$ for bedrocks

2.7 考虑生态环境影响进一步优化

厦门海域是我国国家一级保护哺乳动物中华白海豚的主要栖息地,研究表明水下爆破产生的冲击

波是爆破作业导致海洋生物死亡的主要原因^[17],为了控制海底隧道爆破施工对海洋生物的影响,采用如下公式确定爆破作业在本海域被保护海洋动物的安全峰值速度

$$v_{\max} = \frac{P_{\max}}{\rho_w C_p} \quad (8)$$

式中: P_{\max} 为被保护海洋动物的安全超压临界值,一般可以参考鱼类取 2×10^5 Pa; ρ_w 为海水密度,此处取 1.025×10^3 kg/m³; C_p 为海水纵波波速,此处取1500 m/s。海域爆破条件下的峰值速度预测公式采用依托翔安海底隧道工程基于量纲分析原理对现场监测数据回归建立的如下公式^[18]

$$v = 100\ 500 \left(\frac{\sqrt[3]{Q'_{\max}}}{R} \right)^{-0.80} \left(\frac{h_3 R^2 h_2}{Q'_{\max}} \right)^{-1.15} \quad (9)$$

式中: R 为被保护海洋动物所在海域位置监测点至孤石和基岩凸起段爆破药包中心距离, m; Q'_{\max} 为考虑被保护海洋动物安全的孤石和基岩凸起段爆破最大单孔装药量, kg。

综合考虑最不利因素及安全系数,取 $R = 80$ m,联立公式(8)和(9),计算出考虑被保护海洋动物安全的孤石和基岩凸起段爆破的最大单孔装药量 Q'_{\max} 。将孤石和基岩凸起段边缘孔、其它孔的 Q_{\max} 和考虑海洋生物安全的 Q'_{\max} 计算结果采用散点图绘制,结果如图9和图10所示。由图9和图10可知,孤石和基岩凸起段边缘孔、其它孔的最大单孔装药量均小于考虑海洋生物安全的最大单孔装药量,爆破方案可行。

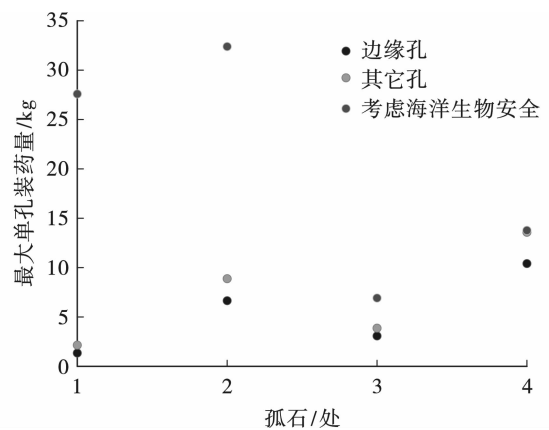


图9 孤石处 Q'_{\max} 计算值

Fig. 9 Calculated Q'_{\max} for boulders

3 现场爆破预处理效果验证

3.1 现场取芯检测结果

为检验所提方法在实际工程中的爆破效果,对

爆破预处理后的结果进行取芯检测验证。对孤石段区域每处取芯 2 处, 其中一处位于孤石中心位置, 所取芯样如图 11 所示; 基岩凸起段处检测数量按总爆破孔数的 3%, 某处所取芯样如图 12 所示。取芯检测结果表明, 爆破预处理后的全部块度都在 30 cm 以内, 大部分块度在 25 cm 以内, 满足盾构出渣要求, 不需要进行二次爆破。

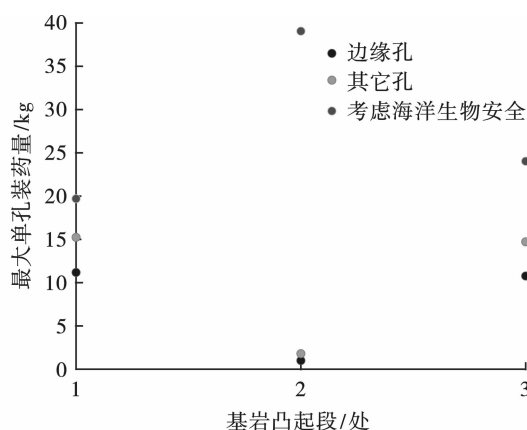


图 10 基岩凸起段处 Q'_{max} 计算值

Fig. 10 Calculated Q'_{max} for bedrocks



图 11 孤石爆破预处理芯样

Fig. 11 Core samples after boulder blasting pretreatment



图 12 基岩凸起段爆破预处理芯样

Fig. 12 Core samples after bedrock blasting pretreatment

3.2 爆破预处理段盾构推进情况

孤石和基岩凸起段经爆破预处理后采用盾构机进行作业, 推进过程中, 压力、液位稳定, 盾构机在此区间未产生异常情况, 均顺利通过。

进一步地, 对正常段和爆破后孤石和基岩凸起

段的盾构总推力、总扭矩、掘进速度和刀盘转速参数进行分析。其中, 左线(246~408环)正常段平均总推力为 14 074 kN, 爆破后孤石和基岩凸起段的平均总推力 14 554 kN, 爆破预处理段相对于正常段平均总推力增加了 3.41%; 右线(239~388环)正常段平均总推力为 11 959 kN, 爆破后孤石和基岩凸起段的平均总推力 12 397 kN, 爆破预处理段相对于正常段平均总推力增加了 3.66%; 爆破预处理段与正常段的盾构掘进平均总推力相近。此外, 爆破预处理段的盾构总扭矩为 1~2 MN/m, 掘进速度为 10~20 mm/min, 刀盘转速为 1.0~1.5 RPM。从参数上来看, 采用本文所述方法对孤石和基岩凸起段进行爆破预处理达到了理想的效果。

3.3 对海域生态环境的影响

为最大程度确保爆破作业对白海豚不造成危害, 爆破作业开始前利用声墙驱赶法将海域中华白海豚驱赶到安全距离(保险起见, 取 200 m)之外的保护水域, 爆破作业过程中现场监测保护水域的声压峰值均未超过 2 kPa, 据观测附近海域中华白海豚活动无任何明显异常, 证明了所提爆破预处理方法对海域生态环境没有产生不良影响。

4 结论

(1) 依托厦门轨道交通 2 号线工程, 综合考虑海域孤石和基岩凸起段的覆盖层条件、爆破块度控制指标及海洋生物安全控制标准, 提出了一种海域盾构隧道孤石和基岩凸起段的精细化爆破预处理方法。基于现场取芯检测结果、盾构推进情况及对海域生态环境影响的监测结论, 验证了所提方法取得了良好的爆破预处理效果。

(2) 本文所提爆破预处理方法科学精细、步骤明确、可操作性强, 在进行海域盾构隧道孤石和基岩凸起段爆破方案设计时除了考虑各种常规设计因素外, 同时全面考虑了海域中孤石和基岩凸起段每个设计炮孔处的水压深度、软土覆盖层厚度及孤石和基岩凸起段厚度等具体爆破环境条件, 比现有设计方法具有更加明确的理论依据和针对性。同时, 克服了现有技术中海域孤石和基岩凸起段爆破参数无针对性理论确定依据、块度效果控制不理想以及不考虑爆破作业对海洋生态环境影响等缺点和不足。

(3) 文中计算单孔装药量时安全距离取 $R=80$ m, 尽管有研究数据表明距爆源安全距离以外的声压峰值和声压级均较小, 但为了最大程度减小爆破作业对白海豚的危害, 建议采取适当的措施(如渔船、声波或电磁波驱赶法)对海洋生物进行驱赶和保护,

从而达到更高的安全性。

(4) 由于孤石和基岩凸起段上方的覆盖层构造较为复杂,简单的等效深度和等效厚度不能够反映现场的真实条件,更精细的水下炸药单耗确定方法及块度控制模型有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 竺维彬,黄威然,孟庆彪,等. 盾构工程孤石及基岩侵入体爆破技术研究[J]. 现代隧道技术,2011,48(5):12-17.
- [1] ZHU Wei-bin, HUANG Wei-ran, MENG Qing-biao, et al. Research on controlled blasting technology for boulders and invading bedrock in shield construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 12-17. (in Chinese)
- [2] 祝思然,孙利. 盾构隧道花岗岩球状风化体控制爆破效果数值分析[J]. 现代隧道技术,2019,56(5):150-156.
- [2] ZHU Si-ran, SUN Li. Numerical analysis of controlled blasting effect of the spheroidal weathered granite body in shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 150-156. (in Chinese)
- [3] 周文海,胡才智,包娟,等. 含节理岩体爆破过程中应力波传播与裂纹扩展的数值研究[J]. 力学学报,2022,54(9):2501-2512.
- [3] ZHOU Wen-hai, HU Cai-zhi, BAO Juan, et al. Numerical study on crack propagation and stress wave propagation during blasting of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(9): 2501-2512. (in Chinese)
- [4] 欧玉峰,陈培义,李友军,等. 大片区孤石爆破控制起爆技术分析及应用[J]. 工程爆破,2019,25(6):71-75.
- [4] OU Yu-feng, CHEN Pei-yi, LI You-jun, et al. Analysis and application of controlled initiation technology for large-area boulders blasting[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 71-75. (in Chinese)
- [5] 许贵华. 聚能装药技术在地铁盾构孤石爆破处理中的应用研究[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [5] XU Gui-hua. Research on the application of shaped charge technology in the blasting treatment of isolated stone of metro shield[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018. (in Chinese)
- [6] 沈顺平,陈建洲,林育仁. 复合地层海底隧道盾构岩石控制爆破技术[J]. 工程爆破,2020,26(2):65-68.
- [6] SHEN Shun-ping, CHEN Jian-zhou, LIN Yu-ren. Controlled blasting technology for shield rock in subsea tunnel of composite stratum[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 65-68. (in Chinese)
- [7] 梁奎生,荆永滨,柴修伟,等. 泥水平衡盾构隧道基岩孤石控制爆破预处理技术[J]. 爆破,2017,34(2):105-109.
- [7] LIANG Kui-sheng, JING Yong-bin, CHAI Xiu-wei, et al. Technology of controlled blasting pre-treatment of bedrock and boulders in slurry shield tunnel[J]. Blasting, 2017, 34(2): 105-109. (in Chinese)
- [8] 丁锐,路耀邦,党如姣,等. 侵入盾构隧道基岩地面钻孔地下爆破预处理及效果检验技术[J]. 隧道建设,2013,33(3):224-230.
- [8] DING Rui, LU Yao-bang, DANG Ru-jiao, et al. Pretreatment of bedrock intruding into shield tunneling scope by means of blasting hole drilling from ground surface and blasting underground[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(3): 224-230. (in Chinese)
- [9] 卢少壮,赵璐,郭志峰. 大直径盾构穿越滨海孤石地层精准物探与处置技术研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(5):195-204.
- [9] LU Shao-zhuang, ZHAO Lu, GUO Zhi-feng. Study on precise geophysical prospecting and processing technique for large-diameter shield tunnelling through coastal boulder strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(5): 195-204. (in Chinese)
- [10] JTS 204—2023 水运工程爆破技术规范[S]. 2023:14-22.
- [10] JTS 204—2023 Technical Code of Blasting for Port and Waterway Engineering[S]. 2023:14-22. (in Chinese)
- [11] 张庆彬,阳军生,吴从师,等. 上覆岩土条件下孤石爆破预处理炸药单耗实验[J]. 爆炸与冲击,2016,36(5):695-702.
- [11] ZHANG Qing-bin, YANG Jun-sheng, WU Cong-shi, et al. Experiment of explosive consumption by blasting pre-treated boulders with overlying stratum of rock-soil[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5): 695-702. (in Chinese)
- [12] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting[C]//Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Sweden, 1983(8):39-453.
- [13] 张正宇,张文焯,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:110-111.
- [13] ZHANG Zheng-yu, ZHANG Wen-xuan, WU Xin-xia, et al. Blasting of modern water conservancy and Hydropower Engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003:110-111. (in Chinese)