

文章编号: 1007-2993(2024)03-0273-06

繁华城区盾构工程孤石微动探测方法及爆破技术研究

刘皓铭¹ 宋青山² 苏栋¹ 曾德成² 平洋² 张晓²

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100024)

【摘要】 微动探测技术以其快速、经济、受场地条件限制小等特点, 广泛应用于浅部地质结构探测。孤石在我国南方花岗岩地区普遍存在, 为解决盾构机在地层掘进时遇到大直径孤石难处理的问题, 以珠海兴业快线(南段)二标为依托工程, 采用微动探测技术, 基于微动台阵探测地球物理探测方法, 利用类空间自相关法-SPAC 法从微动台阵记录中提取瑞雷波频散曲线, 通过数据分析反映地层岩性变化, 解释地质情况。结合钻孔探测的方式精确地获取孤石的大小及位置。采用控制性深孔爆破技术对盾构隧道范围内的孤石进行爆破预处理, 优化布孔参数和装药量, 根据施工现场取芯情况, 爆破效果均可满足单体控制在 30 cm 以内, 破碎效果良好, 完全满足盾构机掘进施工的要求。研究成果可为类似地层盾构施工工程提供借鉴和参考。

【关键词】 孤石爆破处理; 微动检测; 盾构隧道; 复合地层

【中图分类号】 P631

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.003

Research on Micro-motion Detection Method and Blasting Technology for Isolated Rocks in Shield Construction in Prosperous Urban Areas

Liu Haoming¹ Song Qingshan² Su Dong¹ Zeng Decheng² Ping Yang² Zhang Xiao²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 2. CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

【Abstract】 Micro-motion detection technology is widely used in shallow geological structure detection due to its fast, economic, and adaptation to site conditions. Isolated rocks are common in the granite area of southern China. To solve the problem of large-diameter isolated rocks encountered during shield tunneling in the second bid of Zhuhai Xingye Express Line (south section), the following approaches were adopted. First, the micro-motion detection technology was used. The micro-motion array detection geophysical detection method, and the quasi-spatial autocorrelation method-SPAC method were used to extract the Rayleigh wave dispersion curve from the micro-motion array records. Data analysis can directly reflect the change of formation lithology and explain the geological conditions. Secondly, the size and location of the isolated rocks can be accurately obtained by combining it with the method of borehole detection. Finally, the controlled deep-hole blasting technology was used to blast the isolated rocks within the scope of the shield tunnel, with optimized hole layout parameters and charge quantity. According to the coring results from the construction site, the blast can ensure a good crushing effect with the size of single body being within 30 cm. This fully meets the requirements of the shield tunneling construction. The research results can provide a reference for shield construction projects in similar strata.

【Key words】 isolated rocks blasting treatment; micro-motion detection; shield tunnel; composite formation

0 引言

由于岩石的结构、岩性、矿物成分以及环境的差异, 对风化的抵抗能力也不同。在花岗岩地区, 当岩石本身存在交叉的节理时, 这些节理会将岩石分割成多边形块状, 由于风化作用, 多边形块的棱角部分会逐渐转化成土, 而被节理包围的岩块则变得更加圆滑,

最终形成球状风化体(也称为孤石)。这些球状风化体主要分布在全风化带和强风化带中, 其大小、规模具有随机性和难以预测性^[1]。在由于孤石独立于土体之中, 强度远远高于周边土体, 掘进过程中会在刀盘前方随刀盘转动, 在后期盾构机掘进过程中, 如果处理不当, 极易出现刀具破坏、卡刀盘、卡螺机的情

作者简介: 刘皓铭, 男, 2000 年生, 汉族, 辽宁沈阳人, 在读硕士研究生, 主要从事岩土工程技术研究。E-mail: 986128783@qq.com
通讯作者: 苏栋, 男, 1978 年生, 汉族, 福建龙岩人, 博士, 教授, 主要从事地下基础设施智能监测与风险决策等方面研究。E-mail: sudong@szu.edu.cn

况,甚至可能造成长时间停机、损坏刀盘以及盾构转向偏离隧道轴线等严重问题^[2-3],导致盾构无法正常掘进。因此,在盾构施工开始之前探明孤石非常有必要。

目前,用于地层结构测量的主要方法是利用人工激发的地震波在不同弹性介质的地层内传播规律。地震波在介质中传播时携带了丰富的地质信息,这些信息通过波速、频率和振幅等特性来体现。其中波速主要受构成岩石物质的物理性质影响,因此地震波速度与岩体的结构特征密切相关。不同类型的岩石通常具有不同的地震波传播速度,即使是相同的岩层,由于其结构特征变化,波场分布也会发生新的变化^[4]。

浅层横波反射地震和纵波反射地震是两种主要的地层结构测量方法,具有高频特性出色、反射能量强、分辨率高的特点,能够有效识别浅层和深层的波阻抗界面以及速度结构。然而,这两种方法也存在一些局限性,尤其是在城市区域抗干扰能力较差,难以保证数据质量。此外,复杂的施工场地环境难以满足浅层地震勘测的施工条件^[5-6]。

面波勘探是近年来迅猛发展的新兴工程地球物理探测技术,经济高效、实施迅速、易于激发,且对场地条件的要求相对较低^[7]。已应用于多个领域,包括地质结构分层、岩溶地质勘查和城市地质调查等。

在盾构推进过程中遇到孤石,不仅会增大盾构机刀具损坏的风险,还可能会引起地层扰动、隧道塌方、冒顶等严重灾害^[8]。本研究以珠海兴业快线(南段)二标为例,通过微动探测技术对地层存在的孤石进行探测,并对探测出的孤石进行爆破预处理,保证

了工程的顺利进行。

1 工程背景

1.1 工程概况

兴业快线(南段)二标段施工项目主线自板樟山北侧工作井以北,以盾构隧道形式依次下穿柠溪路、人民东路、银桦路后,采用明挖隧道形式接入梅华东路以南顶管工作井处。主线盾构段长度为 1739 m,明挖段长度约 561 m,箱型结构。主线盾构隧道外径 15.2 m,内径 13.9 m,管片厚 650 mm,环宽 2.0 m,线路纵断面呈“V”字形,最大纵坡 40%,最小平曲线半径 599.5 m,最小竖曲线半径 1500 m,最大竖曲线半径 2500 m,隧道最小埋深 9.8 m,最大埋深 41.3 m。

1.2 水文地质条件

珠海位于珠江口西南方,依山傍海,地形西北向东南倾斜,主要山脉呈北东向展布,属亚热带海洋性气候,雨量充沛。山区地势较陡,排泄条件好。河口平原区,软土厚度较大,渗透条件差,地表水就近排入河涌或江河海域中。该工程主要地下水分为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水。地下水位高,平均地下水位为 1.5 m。

1.3 工程地质条件

根据地质详勘资料,主线盾构洞身范围内主要不良地质有砂土层长度 285 m(其中可液化砾砂层长度为 256 m);上软下硬地层长度为 838 m;全断面岩层长度为 617 m,岩石单轴抗压强度最高 131 MPa;隧道范围内孤石 9 处,并存在两处胡湾断裂带。另外有中等、微风化花岗岩孤石,孤石埋深位于隧道洞身深度范围内(见图 1)。

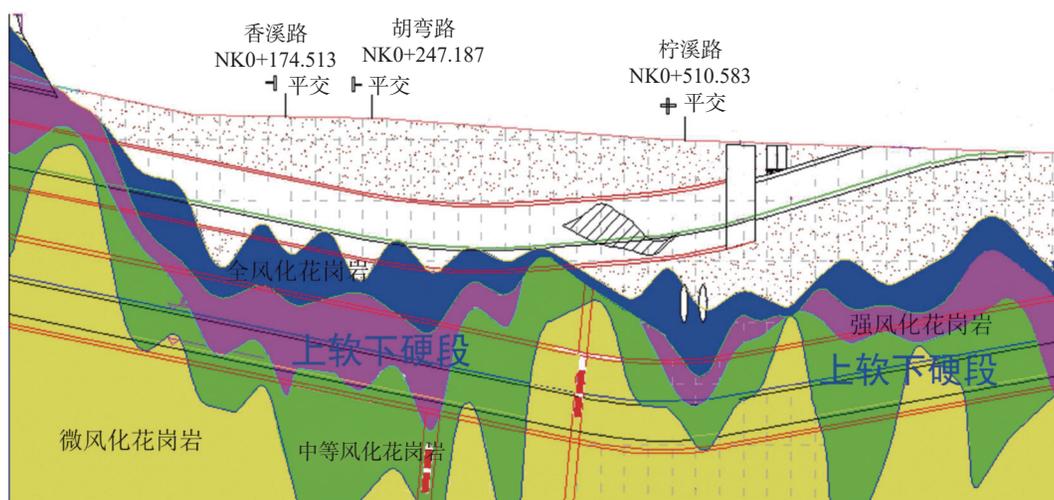


图 1 工程纵断面地质情况示意图

2 盾构隧道范围内孤石探测方法

2.1 微动探测原理简介

微动探测是一种基于微动台阵的地球物理勘测

方法,基本原理为^[9]:①在地面上部署一个环形阵列,其中一个台站位于圆心,而其他 n 个台站均匀分布在以半径为 r 的圆周上;②采用 SPAC 算法^[10],计算

中心台站与圆周上各个台站之间的相关系数, 并对其方位平均处理; ③从微动台阵的记录中提取瑞雷波频散曲线, 用于计算视 S 波速度 V_s ; ④通过插值和平滑技术, 生成二维视 S 波速度剖面。这个速度剖面可以反映地层岩性的变化, 为地质解释提供了基本数据^[11]。此外, 面波相速度的水平分量和垂直分量的

比值可用于绘制 H/V 曲线。H/V 曲线的峰值反映地下岩土层的阻抗界面, 也是确定土层分界面的一种方法。

2.2 H/V 曲线测试说明

H/V 曲线根据曲线的形态大致可以分为 5 类, 不同类型的曲线形态反映了不同的地层结构^[12], 一般规律如表 1 所示。

表 1 H/V 曲线不同形态特征分析表

类型	曲线形态特征
单峰型	H/V 曲线显示出一个明显的峰值, 通常表示存在一个显著的地下土层或岩石界面, 振幅在该频率下最大
多峰型	H/V 曲线显示出多个峰值, 通常表示存在多个地下土层或岩石界面, 每个峰值对应不同频率范围的振幅增加
平坦型	H/V 曲线在广泛的频率范围内基本平坦, 没有明显峰值, 通常表示土层较均匀或在所研究频率范围内不存在明显的土层界面
倒 U 型或 V 型	H/V 曲线在低频率时振幅逐渐上升, 然后在中等频率范围内出现峰值, 之后振幅下降, 这种形态可能与特定地质条件或土层结构相关
不规则型	H/V 曲线可能在不同频率范围内出现多个峰值和谷值, 通常表示地下结构可能非常复杂, 或者土层不均匀, 存在多个界面

2.3 探测成果分析

微动数据处理后, 可获得面波相速度等值图、H/V 曲线及 H/V 等值图等探测成果。K0+131.5—K0+

391.5 中轴线左偏 5 m 剖面 H/V 等值图、面波相速度等值线图见图 2。

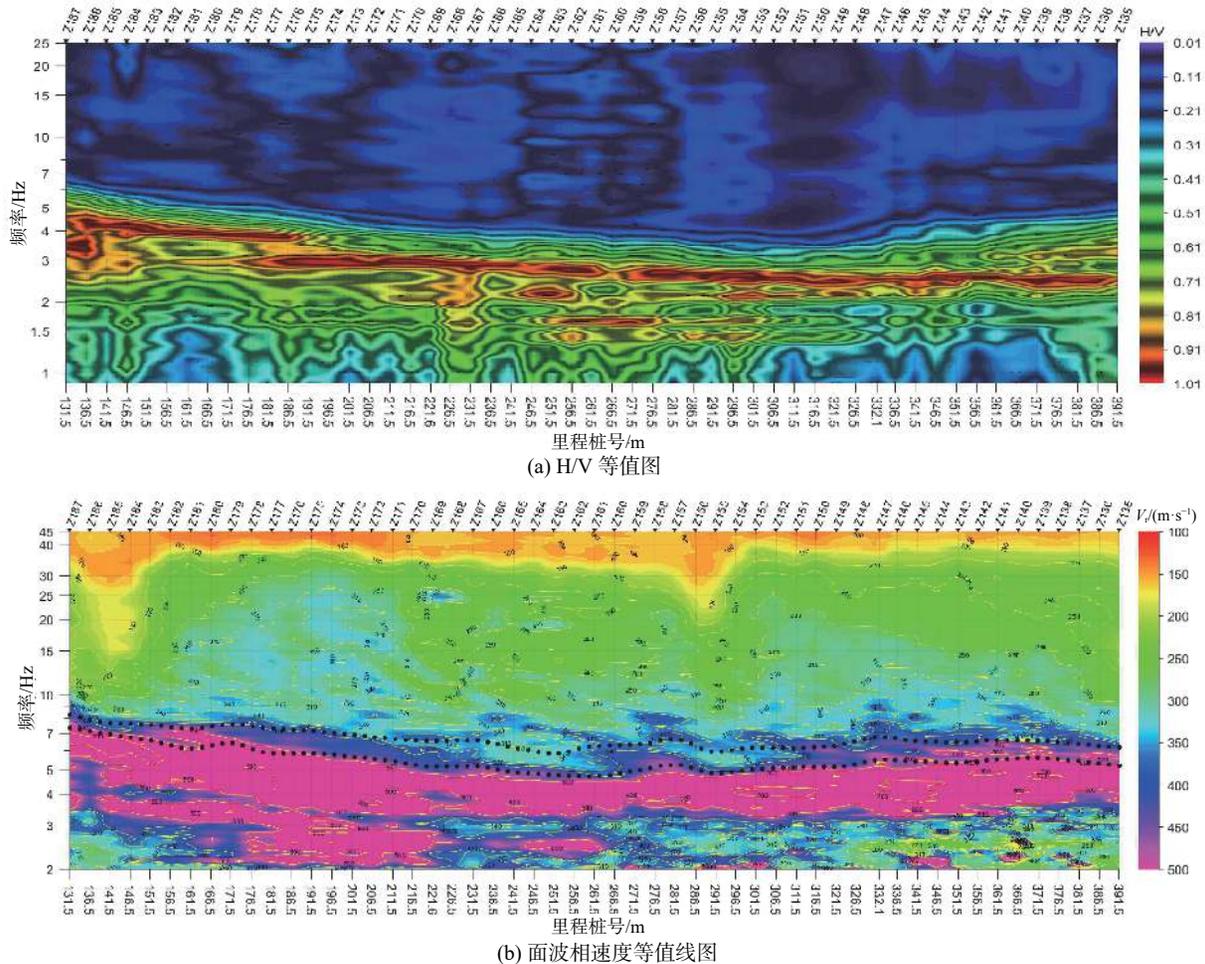


图 2 K0+131.5—K0+391.5 中轴线左偏 5 m 剖面微动探测结果

根据检测结果, H/V 曲线基本呈多峰型和倒 U 型或 V 型。在剖面两端, Z187-Z170 和 Z152-Z135 测点范围内, H/V 峰值频率较高, 等值线抬升明显, 在隧道洞身内速度较高。在剖面中段隧道洞身下部速

度较高。综合微动探测速度及 H/V 成果, 结合附近钻孔推断剖面内存在孤石和基岩凸起的可能性较大。

K0+131—K0+391 中轴线剖面 H/V 等值图、面波相速度等值线见图 3。

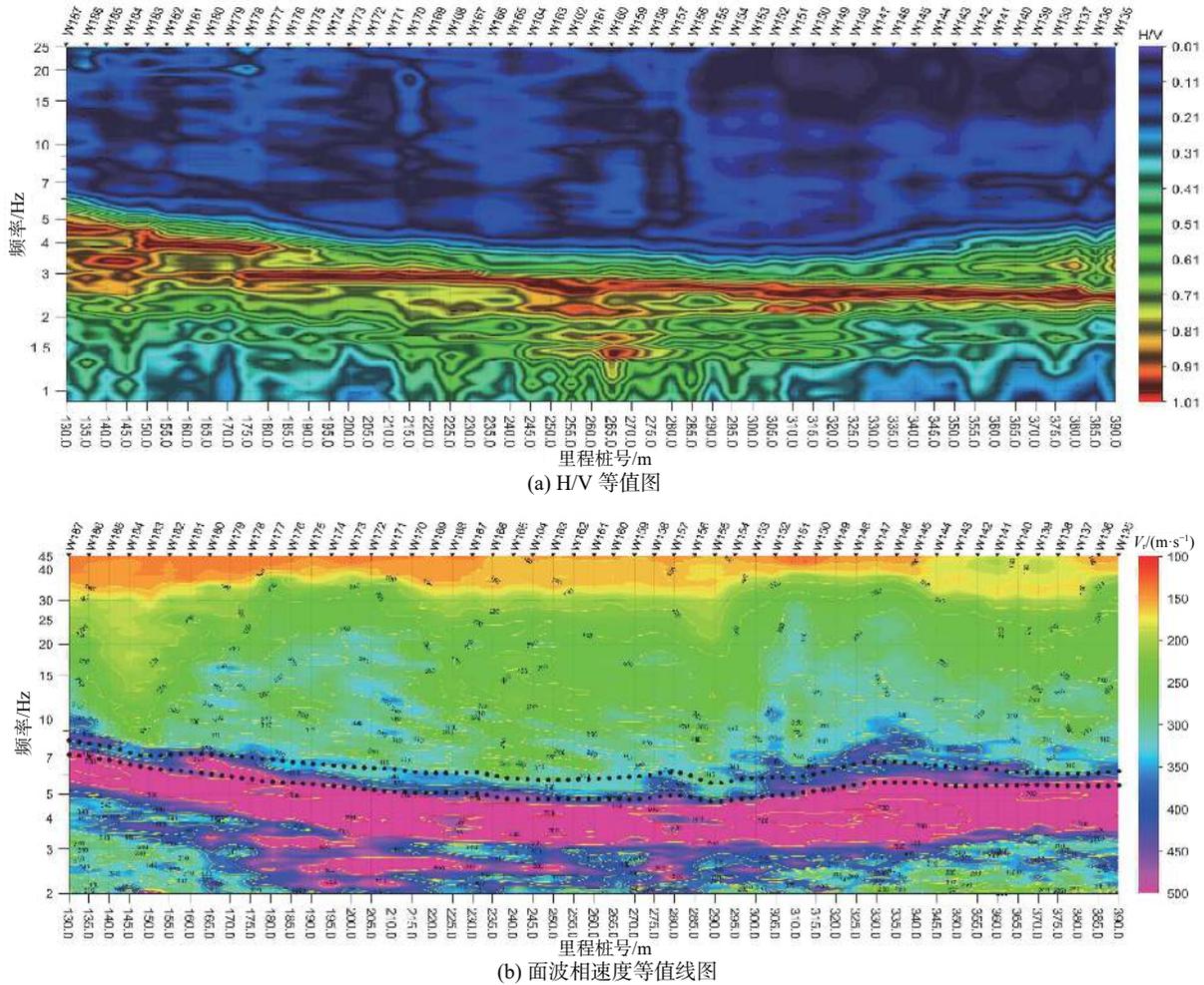


图 3 K0+130—K0+390 中轴线剖面微动探测结果

根据检测结果, H/V 曲线基本呈多峰型和倒 U 型或 V 型。在剖面两端, W187-W170 和 W152-W135 测点范围内, H/V 峰值频率较高, 等值线抬升明显, 在隧道洞身内速度较高。在剖面中段隧道洞身下部速度较高。综合微动探测速度及 H/V 成果, 结合附近钻孔推断剖面内存在孤石和基岩凸起的可能性较大。

K0+131.5—K0+391.5 中轴线右偏 5 m 剖面 H/V 等值图、面波相速度等值线见图 4。

根据检测结果, H/V 曲线基本呈多峰型和倒 U 型或 V 型。在剖面两端, Y187-Y170 和 Y152-Y135 测点范围内, H/V 峰值频率较高, 等值线抬升明显, 在隧道洞身内速度较高。在剖面中段隧道洞身下部速

度较高。综合微动探测速度及 H/V 成果, 结合附近钻孔推断剖面内存在孤石和基岩凸起的可能性较大。

2.4 钻孔验证

根据微动物探测可能存在孤石的位置, 将盾构孤石专勘中的孤石范围缩小, 通过补勘确定验证孔的坐标, 然后再通过地质钻机在可能存在孤石的位置中心进行钻孔验证。以 K0+131—K0+390 里程范围统计为例, 盾构区间内疑似孤石 35 处, 共钻孔验证到孤石 20 处, 位于隧道范围内孤石有 17 处, 孤石饱和单轴抗压强度 20.20 ~ 141 MPa, 平均强度 95.88 MPa, 施工现场通过地质钻机取芯验证, 验证孤石与微动物探测匹配率在 57% 以上。

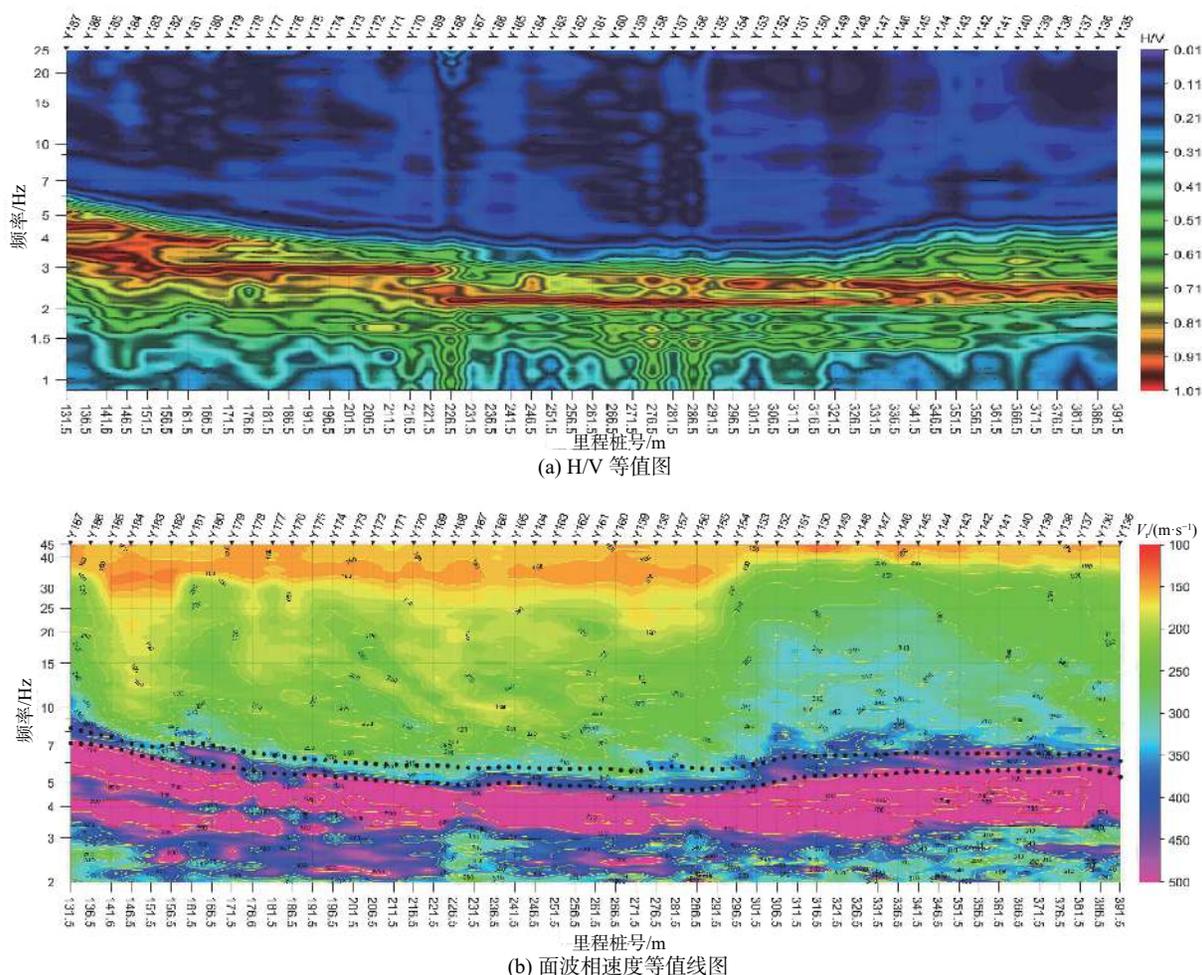


图4 中轴线右偏5m剖面微动探测结果

3 孤石爆破处理方法及效果分析

3.1 区间孤石爆破参数设计

3.1.1 布孔参数设计

工程位于城市市中心,在城区主干道上爆破施工应注意布孔间距设计,同时满足盾构机的掘进要求,确保施工处理后的孤石能顺利进入刀盘。对区间盾构隧道内孤石的钻爆技术进行设计,设计原则为:

(1)处理盾构区间隧道范围内发现的直径大于60 cm的孤石(根据刀盘开口尺寸以及破碎机破碎能力设定);

(2)孤石破碎块度要求不大于30 cm;

(3)通过爆后钻孔取芯方式进行爆破效果检验。

3.1.2 钻孔方案设计

钻孔要求:(1)孤石爆破区域选用地质钻机钻孔;(2)钻孔孔径90 mm;(3)成孔后,孔内下放75 mm的PVC装药套管^[13];(4)钻孔过程中,要对岩层取芯,并记录施工数据,以确定位置及计算药量。

成孔施工工序:测量放线→地质钻孔安装、钻进→安装套管→地质钻孔至孤石底→提出钻杆、下

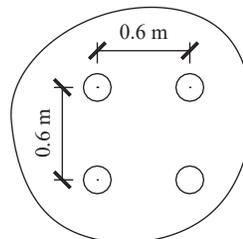
PVC管。

3.1.3 爆破方案设计

(1)布孔设计

为了将孤石处理为单边长度小于30 cm的碎块,根据孤石的厚度合理布置钻孔间距。

孤石取芯厚度 ≤ 1 m时,设计钻孔间排距0.6 m \times 0.6 m,如图5所示;孤石取芯厚度 > 1 m时,设计钻孔间排距0.7 m \times 0.7 m,如图6所示。

图5 孤石厚度 ≤ 1 m布孔设计

(2)装药设计

由于岩石厚度不均,考虑到测量以及药包吊装过程中产生的误差,其中一个炮孔钻至孤石底面,装药至炮孔底部,孤石顶面留10 cm不装药,其邻孔

底距离孤石底面 10 cm, 装药至炮孔底部, 孤石顶面留 10 cm 不装药。

①对于岩厚 ≤ 1 m 的孤石, 采取单个药包连续装药方式, 每个药包接双发起爆雷管;

②对于岩厚 > 1 m 的孤石, 采取多个药包间隔装药方式, 每个药包接双发起爆雷管。如无震动要求, 单个孔内药包使用同段雷管。

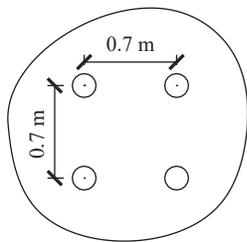


图6 孤石厚度 > 1 m 布孔设计

3.2 炸药单耗计算

根据孙利^[14]推导的炸药单耗公式

$$q = \frac{\pi \rho_w}{4} \left(\frac{3.1 [\sigma_t]}{b \rho_w D^2} \right)^{\frac{2}{a}} \left(\frac{2}{nk^{6-a}} \right)^{\frac{2}{a}}$$

式中: ρ_w 为装药密度; $[\sigma_t]$ 为岩石单向抗拉强度; D 为装药爆速; k 为不耦合系数 $k=r_b/r_0$, r_b 为装药半径; r_0 为炮孔半径; n 为爆破气体碰撞岩壁时产生的应力增大倍数, $n=8 \sim 11$; a 为衰减指数, $a=2-\mu(1-\mu)$, $b=\mu(1-\mu)$; μ 为泊松比。

根据公式计算, $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$, 根据孤石的勘察资料, $[\sigma_t]=3.81 \text{ MPa}$, 孤石的泊松比 $\mu=0.27$, $b=0.20$, $a=1.80$, 炸药爆破速度 $D=3600 \text{ m/s}$, 计算炸药单耗 $q=3.28 \text{ kg/m}^3$ 。

3.3 爆破效果验证

在完成爆破后, 当已爆破区域达到一定范围, 应在此范围内再次钻孔取芯, 以检验爆破效果。根据经验, 地下岩体爆破影响范围为 $2 \sim 3 \text{ m}$ ^[15], 因此为检验爆破效果, 本工程中以 $6 \sim 9 \text{ m}^2$ 作为一组爆破区域布置取芯孔, 且根据取芯具体情况, 及时调整取芯参数。确认预裂爆破效果, 爆破完成后岩体碎石可顺利通过刀盘开口进入泥水仓, 并能通过泥浆管路输送至地面, 进而提高施工效率, 缩短施工工期。根据施工现场取芯情况, 爆破效果均可满足单体控制在 30 cm 以内。

4 结论

采用微动探测技术对珠海兴业快线(南段)盾构隧道不良地质体进行探测, 对复合地层中孤石的勘察及孤石处理等关键技术进行了研究, 取得以下结论:

(1)复合地层中孤石的存在是地下工程施工的难点, 孤石的预处理可减少刀盘刀具磨损的风险, 可

保证盾构顺利掘进, 可有效地避免超大直径泥水盾构在复合地层中掘进的各种施工风险。

(2)根据盾构机施工要求, 控制爆破后的孤石尺寸, 优化深孔爆破方案、爆破药量, 本工程通过优化布孔参数和装药量, 通过取芯验证, 爆破后的岩芯长度均控制在 30 cm 以内。

参考文献

- [1] 李红立, 潘冬明, 张华, 等. 基于孤石的弹性波波速和电磁波衰减特性层析成像技术对比研究[J]. 工程勘察, 2016, 44(10): 72-78.
- [2] 竺维彬, 鞠世健. 广州复合地层与盾构施工技术[C]//上海隧道工程股份有限公司. 大直径隧道与城市轨道交通工程技术——2005 上海国际隧道工程研讨会文集. 上海: 同济大学出版社, 2005.
- [3] 刘建国. 深圳地铁盾构隧道施工技术与管理[J]. 隧道建设, 2012, 32(1): 72-87.
- [4] 张平松, 李永盛, 杨华忠. 硬岩深孔爆破破坏范围地震波 CT 测试[J]. 工程勘察, 2012, 40(5): 30-33.
- [5] 陈国玉, 陆晓春, 龚育龄. 横波勘探在基岩埋深调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(1): 89-94.
- [6] 岳航羽, 张保卫, 王凯, 等. 一种适用于沿海滩涂区的浅层高精度地震探测技术[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1225-1235.
- [7] 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 用面波联合勘探技术探测浅部速度结构[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 2199-2206.
- [8] 王春玲. 盾构区间基岩凸起和孤石处理技术[J]. 交通科技与经济, 2019, 21(4): 54-57, 80.
- [9] 高艳华, 黄溯航, 刘丹, 等. 微动探测技术及其工程应用进展[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(23): 146-155.
- [10] AKI K. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bulletin, Earthquake Research Institute, 1957, 35: 415-456.
- [11] 刘宏岳, 贺华. 复杂场地条件下的地球物理探测方法选择与工程实例[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(2): 155-159.
- [12] 衣利伟, 黄两宜, 曹勇, 等. 微动探测技术结合深孔爆破在处理盾构孤石中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 884-891.
- [13] 张帆, 林从谋, 肖绍清, 等. 地铁盾构孤石预爆破破碎范围计算方法[J]. 工程爆破, 2017, 23(1): 34-38.
- [14] 孙利. 盾构隧道隐蔽岩体控制爆破技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [15] 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.