

定向钻探技术在复杂城区隧道勘察中的应用及探讨

赵飞涛¹, 窦斌^{*1}, 陶维昱¹, 管应稳¹, 项洋², 苗晋伟³, 沈绍波³, 王勇刚⁴

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430015;

3. 陕西太合智能钻探有限公司, 陕西 西安 710086; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要:定向钻探技术具有穿越能力强、轨迹可控的优势,在传统勘察难以实施的区域,定向钻探可远距离开孔绕避地面障碍物对预定区域进行勘察。某城区隧道在建筑密集区域进行定向钻探,选择在合适地远离开孔,通过轨迹调整沿隧道底板下方1 m进行钻进,同时主孔上部实施2个分支孔,采用提钻取心工艺对全部区段进行间隔取心,并完成微动谱比法和孔内声波电阻率等物探测试。主孔最大埋深69 m,进尺650.75 m,轨迹最大偏移0.81 m。项目的成功实施证明,定向钻进技术与物探测试技术结合,可弥补传统勘探方法存在的不足,更好的揭露隧道围岩地质情况,为复杂城区隧道勘察提供一种有效手段。同时建议制定明确可行的技术原则和规范促进定向钻探技术在勘察领域的应用。

关键词:定向钻探;轨迹控制;复杂城区;隧道勘察;物探测试

中图分类号:P634.7;U452.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0125-08

Application of directional drilling technology in tunnel exploration in complex urban areas

ZHAO Feitao¹, DOU Bin^{*1}, TAO Weiyu¹, GUAN Yingwen¹,
XIANG Yang², MIAO Jinwei³, SHEN Shaobo³, WANG Yonggang⁴

(1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430015, China;

3. Shaanxi Taihe Intelligent Drilling Co., Ltd, Xi'an Shaanxi 710086, China;

4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430063, China)

Abstract: Directional drilling technology has the advantages of strong crossing ability and controllable trajectory. In areas where traditional exploration is difficult to implement, directional drilling can leave the hole at a long distance to avoid ground obstacles and conduct exploration in the predetermined area. A certain urban tunnel is undergoing directional drilling in a densely built area. It is selected to leave the hole at a suitable distance at a suitable site, and drilling is carried out along the 1m below the tunnel floor through trajectory adjustment. At the same time, two branch holes are implemented in the upper part of the main hole. The core extraction process is used to perform interval core extraction for all sections, and geophysical tests such as micro motion spectral ratio method and borehole acoustic resistivity are completed. The maximum burial depth of the main hole is 69m, the footage is 650.75m, and the maximum deviation of the trajectory is 0.81m. The successful implementation of the project has proven that the combination of directional drilling technology and geophysical testing technology can make up for the shortcomings of traditional exploration methods, better expose the geological conditions of tunnel surrounding rocks, and provide an effective means for complex urban tunnel exploration. At the same time, it is recommended to develop clear and

收稿日期:2022-12-04; 修回日期:2023-07-06 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.018

第一作者:赵飞涛,男,汉族,1988年生,硕士研究生,工程师,地质工程专业,主要从事岩土勘察、岩土设计、地热等方面的工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,858264277@qq.com。

通信作者:窦斌,男,汉族,1973年生,教授,地质工程专业,博士,主要从事干热岩开发研究及教学工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, briandou@163.com。

引用格式:赵飞涛,窦斌,陶维昱,等.定向钻探技术在复杂城区隧道勘察中的应用及探讨[J].钻探工程,2023,50(5):125-132.

ZHAO Feitao, DOU Bin, TAO Weiyu, et al. Application of directional drilling technology in tunnel exploration in complex urban areas [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 125-132.

feasible technical principles and norms to promote the application of directional drilling technology in the field of exploration.

Key words: directional drilling; trajectory control; complex urban area; tunnel survey; geophysical testing

0 引言

长大隧道属于规模大、造价高的线路工程,地质资料的准确性对隧道建设、运营安全都有重要影响,在隧道穿越城区密集建筑群时,受到隧道埋深、施工条件、外界环境的影响,传统勘探手段往往会受到限制甚至难以实施,需要选择合适的勘探方法查明隧道地质条件;定向钻探可以选择合适的施工场地远离开孔,通过造斜技术使钻具沿隧道掘进方向精准的揭示隧道围岩情况。

定向钻探技术起源于石油钻井工业,1932年在美国加利福尼亚州亨延滩完成的石油钻井是现存有记录的最早的定向钻井,目前被广泛应用于矿产勘探开发、管道非开挖铺设领域。经过将近一个世纪的积累和发展,在定向钻探设备、钻进技术、测量技术、轨迹控制技术、取心技术、物探测试技术等方面已经形成了较为完善的体系^[1-13]。

我国在1985年通过引进美国技术完成了黄河

穿越管道的定向钻进施工^[5-6]。川藏铁路隧道工程勘察中,采用斜直孔的方式,完成超深绳索取心定向勘探孔27个,最深孔达1888.88 m;2020年,天山胜利隧道勘察完成定向孔2271 m,并在孔内开展取心和孔内电视探测。众多项目的成功实施证明了定向钻探勘察技术用于隧道勘察的可行性及高效性^[13-17]。

本文对可精准定位的定向钻探技术的主要技术原理进行梳理分析,并以某铁路隧道在复杂城区的应用为例介绍定向钻探技术在隧道勘察领域的实施情况和相关成果。

1 定向钻探技术原理

定向钻探技术是依靠钻具、造斜工艺和随钻测量系统,使钻孔沿预定轨迹钻进的一种钻探方法。当定向钻探技术与取心技术、物探技术、原位测试技术相配合,就会形成在勘察领域极具优势的定向勘探技术,定向勘探装备系统组成见图1。

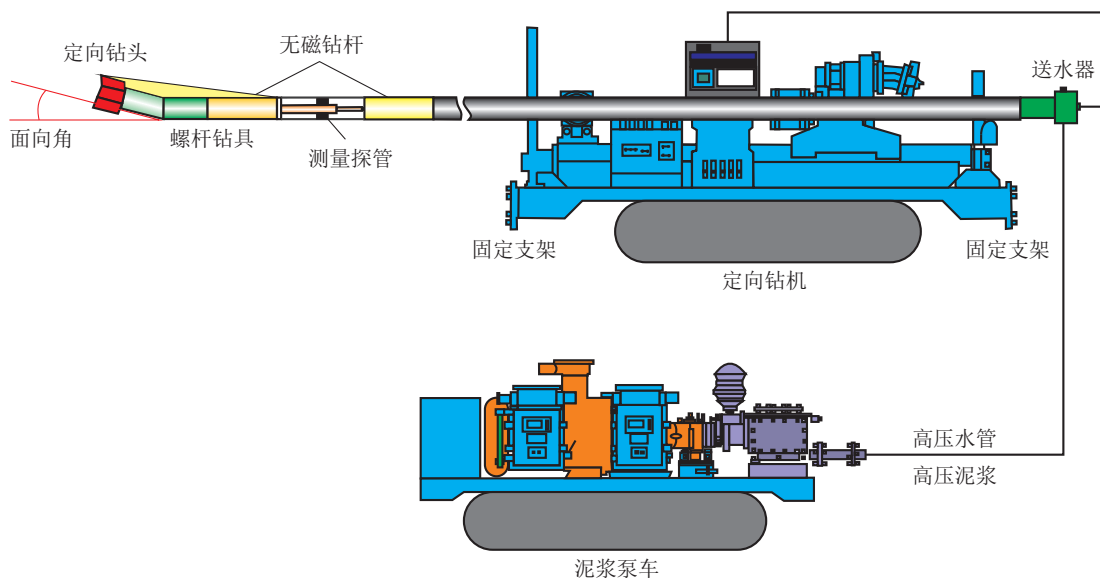


图1 定向勘探装备系统组成示意

Fig.1 Composition diagram of directional drilling equipment system

得益于定向钻探超强的轨迹控制能力,定向勘探具有轨迹灵活、钻进能力强、适应能力强、地面环

境影响小的优势,其钻孔轨迹可根据建(构)筑物需要进行灵活调整,在建筑密集区、复杂水域、陡峻山

区、超前地质预报这些传统钻探实施困难的复杂情况下,可以充分显示出其优越性,达到精细化勘察的目的。

1.1 钻孔轨迹控制技术

钻孔轨迹控制技术是定向钻探的关键技术,其原理是在钻进过程中实时监测钻具相关参数和方位信息,不断与设计轨迹对照并动态调整使钻孔按预定轨迹钻进^[6]。这需要设备满足2个方面的要求,一是钻机、钻具具备良好的机械性能,具备强劲的钻进能力和一定的方位调整能力;二是精确的测量系统可及时反馈钻具位置信息,以便随时对轨迹进行调整。从这个角度,定向钻进技术和测量技术是钻孔轨迹控制技术的基础。

1.1.1 定向钻进技术

目前,定向钻进技术以无岩心钻进为主,使用的井下动力钻具主要有螺杆钻具、涡轮钻具和电动钻具。涡轮钻具长度较大、结构较复杂,不适合在较小的井眼中使用;电动钻具结构复杂、可靠性低、对绝缘性和密闭性的要求高、维修工作复杂困难。所以,定向钻探一般采用螺杆钻具,螺杆钻具具有低速大扭矩、结构简单、后期维修便捷的优点。

一般情况下,通过调节螺杆钻具面向角滑动钻进即可达到造斜的目的,造斜困难时也可采用连续造斜器进行造斜;还可以通过马达定子和钻杆的回转消除结构弯角的导向造斜作用实现“回转稳斜”,复合钻进是“滑动造斜”和“回转稳斜”两种定向模式的复合,有更强的排渣能力,在长距离钻进中有更强的可靠性^[18]。

1.1.2 钻孔测量技术

钻孔轨迹的计算需要获取钻孔不同区段的孔深、倾角和方位角。孔深可根据钻具的长度获得,随钻测量系统(MWD)可在钻进过程中实时获取轨道参数、工具面角(ω)、孔底钻压、扭矩和转速,可通过有线、泥浆脉冲、电磁波、声波和光纤等方式将数据传输到地面。目前设备一般都带有自动计算程序,在实时监测钻进参数的同时可根据设定程序自动计算出实际轨迹,现场与设计轨迹进行对比后可立即进行动态纠偏。

1.2 取心技术

定向钻进取心技术有绳索取心和提钻取心两种,绳索取心受重力和钻孔轨迹影响在定向钻进中应用较为困难,目前提钻取心技术是较为常用可靠

的方式。提钻取心时可将整个钻进过程分为定向钻进(全面破碎)和取心钻进2个部分。定向钻孔由于独特的钻进方式和钻孔轨迹,岩心管极易弯曲,进而影响岩心状态和采取率,增加卡钻风险,当钻孔轨迹经过多次造斜后,取心难度更大。

1.3 测井技术

测井技术是物探技术在钻孔中的应用,通过对测试数据的分析解译可获知岩土体的结构特征和物理力学参数,更好地解决复杂的工程地质问题^[19]。在钻进过程中,随钻测量系统(MWD)增加物探测试功能,如伽马射线、电阻率测试,就形成随钻测井技术(LWD),该技术在获取钻进参数的同时,可获取地层的物理性态特性,提高地层评价能力。

2 工程实施情况

某铁路隧道项目位于珠江三角洲冲积平原区(局部为残丘),桩号DK6+600~DK7+200段采用盾构法施工,断面形式为 $\varnothing 12.4$ m圆形结构,轨面埋深约65 m,隧道洞底线埋深约68 m。

根据《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012),勘察区域属于抗震一般地段,围岩的岩土性质一般,属于中等复杂场地,详细勘察时地下区间勘察点间距应不大于50 m^[20]。

勘察区域内房屋密集、管线交错、交通繁忙、人口密度大,若采用传统垂直孔钻探方法,设计孔位多难以实施,考虑采用定向钻探技术进行勘察。

2.1 钻孔设计

2.1.1 轨迹设计

为获取DK6+600~DK7+200段隧道详细地质情况,根据现场情况和设备性能,将勘察主孔分为造斜段和近水平段,选取一处较为平坦开阔处作为施工场地,场地选择满足定向钻探的曲率半径要求,使钻机可从地面钻至隧道洞身位置进行主孔定向钻探;沿线路方向在隧道底板下方1 m布置主孔,在主孔上部布置2个分支孔,以获取岩层风化界面或上覆盖地层信息。

主孔设计进尺630 m,最大埋深69 m,在225、354 m处分别施工分支孔,2个分支孔合计进尺330 m,成孔顺序为主孔—1号分支孔—主孔—2号分支孔—主孔,钻孔孔径 ≤ 110 mm。另外,为增加钻探成果的可信性,在距离开孔处20 m的洞轴线附近设置垂直验证孔。钻孔轨迹见图2。



图2 DK6+600—DK7+200段定向钻孔布置示意

Fig.2 Directional drilling layout of DK6+600—DK7+200 section

2.1.2 取样要求

沿洞身方向每隔15~30 m取一组岩心,岩面变化较大或存在不良地质区段应加密取心或全孔段取心。

2.1.3 物探测试

钻孔完成后,采用综合测井技术对钻孔进行物探测试,使用震波电法一体化测井仪,一次测量可同时采集波速信号和电阻率数据。同时在地面沿钻孔轨迹进行微动谱比法测试。

物探测试通过物性差异获得岩体性质的变化情况,高密度电阻率通过测试电阻率的变化,可推测岩土体内的结构面等地质特征;声波测试可通过测定岩体声波数据推测岩体状态和物理力学参数;微动谱比法可揭示探测场地的基岩和覆盖层界线。

2.2 钻孔施工情况

2.2.1 施工设备及工艺

根据该项目特点及勘察技术要求,选用ZYL-7000D型履带式全液压定向钻机进行施工。该钻机最大钻进深度1000 m,最大输出扭矩7000 N·m,随机配有螺杆马达、随钻测量系统、钻杆及各类钻头;钻机技术成熟可靠,具有扭矩大、钻速高、可配合取心、可调开孔倾角的优势,适用于各类地层的定向钻进,在矿山矿井超前预报、排放水、瓦斯抽放孔定向施工中应用较为广泛,技术成熟可靠。

钻进过程主要包括开孔、扩孔、定向钻进、取心几个阶段,通过调整钻具组合提高钻进效率和满足取心要求,各施工阶段钻具组合见表1。

表1 钻具组合

Table 1 Drilling tools combination table

阶段	钻杆	钻具	钻头
开孔	Ø73 mm螺旋槽通缆钻杆		Ø110 mm复合定向钻头
扩孔	Ø73 mm螺旋槽通缆钻杆		Ø153 mm扩孔钻头
定向钻进	Ø73 mm螺旋槽通缆钻杆	1.25°定向螺杆钻具	Ø110 mm复合片定向钻头
取心	Ø73 mm螺旋槽通缆钻杆	螺杆钻具+Ø110 mm岩心管	Ø110 mm复合片单管取心钻头

2.2.2 钻孔施工情况及难点

2.2.2.1 轨迹控制

钻孔设计轨迹复杂,轨迹控制难度大,本次定向钻探有效工作日44天,施工主孔孔深650.75 m(投

影距离586 m),1号分支孔孔深152.45 m,2号分支孔孔深161.45 m,累计进尺964.65 m,轨迹偏移量大部分控制在0.5 m误差范围以内,主孔最大偏移0.81 m,2号分支孔在末端498 m处轨迹偏移2.28

m,原因是司钻人员操作失误,导致后续定向时弯头工具面向角调整错误。

2.2.2.2 取心

采用提钻取心工艺,进入深部稳定地层后,钻孔较深,孔内钻进阻力和钻压较大,为提高岩心取心效率,使用“螺杆钻具+岩心管+ $\Phi 110$ 复合片单管取心钻头”的组合方式,一定程度上提高了整体取心效率,但螺杆马达存在一定弯度,影响岩心的完整性,增加了钻杆磨损,因此,在取心前先扩孔一段距离,继而调整螺杆钻具工具面向角进行钻进取心,同时在取心钻头内增加卡簧以便拔断岩心。

2.2.2.3 物探测试

由于钻孔存在弯曲段和水平段,物探测试时难以依靠设备自重到达预定位置,通过在设备前后段加装牵引活塞和推送活塞,依靠高压水冲送顺利完成了测试。

3 钻探成果

3.1 取样

根据规范和设计方案,本次钻探采用提钻取心工艺对全部区段进行间隔取心,共完成取心45组,

其中土样2组,岩样43组,岩心试样完整,间距和试样质量均满足设计要求。典型岩心照片见图3。



(a) 破碎段取心照片



(b) 完整段取心照片

图3 典型岩心照片

Fig.3 Typical core photograph

3.2 物探测试

电阻率与声波在主钻孔中进行,微动谱比法沿隧道轴线地面布置,本次定向钻探总共布设声波、电法测井测线610 m,其中靠近孔口的76.4 m位于护孔的钢套管内部,因钢套管对声波与电法信号存在干扰,严重影响测试数据质量,故本次有效测试数据为裸孔中533.6 m,共采集1069个(0.5 m间距)测点数据。电阻率、波速曲线及微动谱比成果与现场钻探资料揭露情况相对吻合,见图4、图5。

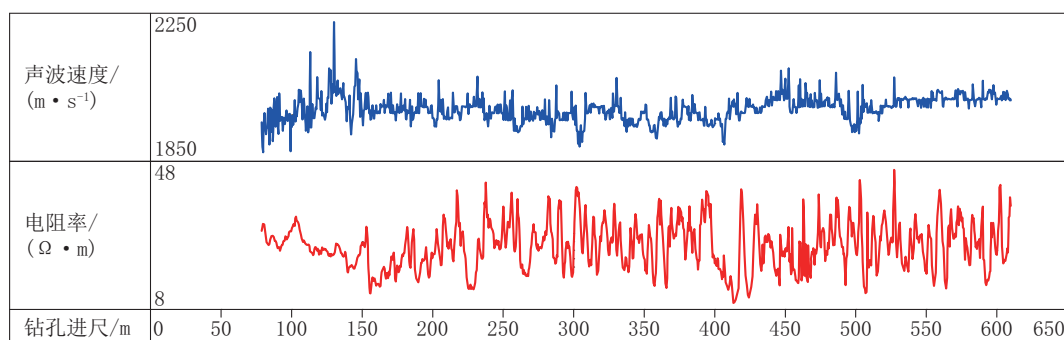


图4 波速和电阻率曲线

Fig.4 Wave velocity and resistivity curve

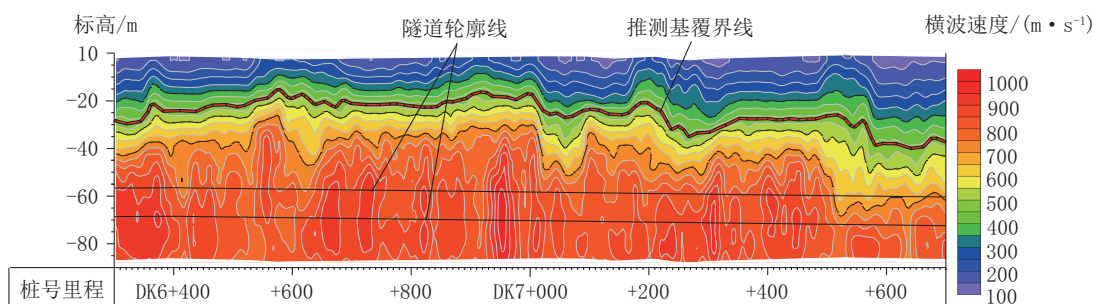


图5 微动谱比成果

Fig.5 Results of fretting spectrum ratio

3.3 综合地质评价

通过钻孔揭露情况,结合取样测试及物探成果,DK6+645~DK6+750里程范围内地层从上到下依次为第四系填土、全一弱风化的白垩系(K)泥质砂

岩、含砾砂岩,基岩节理裂隙发育,但多被泥、钙质充填,透水性及富水性弱。隧道围岩主要为Ⅲ和Ⅳ类围岩,地质剖面见图6。

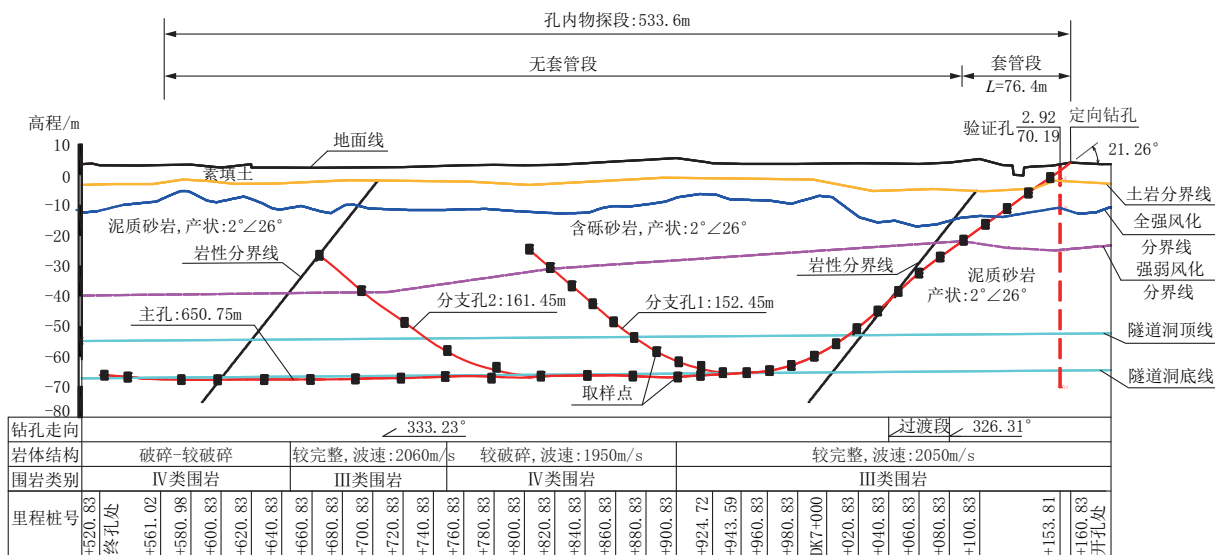


图6 工程地质剖面

Fig.6 Engineering geological profile

本次勘探沿隧道设计轴线附近连续钻进获取了隧道全区段范围的围岩地质情况,查明了勘察区域的地层分布情况和水文地质情况,通过取样试验和物探测试获得了岩土体的物理力学参数,物探成果与钻探情况相符,勘探范围内钻探精度高、测试成果可靠。

4 分析讨论

4.1 主要技术优势

与传统钻探手段相比,定向钻探技术在钻探深度、精度和灵活性等方面有巨大的提升,钻探能力的提升带来的显著优势可以归纳为以下几个方面:

(1)破解地面条件的制约:可控轨迹定向钻探技术具有极强的灵活性和针对性,可通过轨迹调整避开障碍物钻进至预定位置,并完成取样、物探测试等相关任务,完成传统钻探多数情况极难完成的全断面钻进,实现对目标区域地质情况的精准探测。

(2)施工场地友好:在城区实施时可以有效避开地面道路、绿地和住宅,减小钻探施工对周边环境的影响;在山区及水域施工时可通过调整场地位置保障施工安全;可减少频繁的设备转移过程,改善钻

探工作环境。

(3)通过随钻测量系统,可获取钻进参数,通过建立数据和岩土体之间的关联模型后,可实时掌握岩土体特性,提高勘察水平。

(4)通过整合物探与钻探结果,利用钻探成果对物探资料开展精细化解译,实现工程地质勘探过程中钻探物探技术一体化探测,提高工程地质勘探结果的可靠性和准确性^[6]。

4.2 问题及讨论

虽然地质矿产行业标准《定向钻探技术规程》(DZ/T 0054—2014)对定向钻探的实施做了详细规定^[12],但如何制定技术可行、经济适用、满足勘察目的的定向勘察方案,尚无规范对此做出明确规定。定向钻孔的布置方案和取样缺少指标控制,不仅会引发技术人员的困惑,也势必会产生一些争议。

譬如:《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012)对钻孔深度做了明确规定,要求勘探孔应进入隧道底板以下不小于2~3倍的隧洞直径或宽度,在隧道底板下为弱微风化岩石时应满足上述要求或不小于3~5 m^[20]。本案例中钻孔并没有达到该深度,但传统勘察是根据钻孔结合经验推测

钻孔之间的地质情况,定向勘察是沿隧洞底板下部的连续勘探,且隧洞区段位于弱风化泥质砂岩、含砾砂岩中,通过现有勘探方案可充分地掌握隧道围岩地质情况,那么,现有勘察方案是否符合相关规范的要求、是否需要再增加钻探工作量,具体采用什么标准进行判定,都是值得商榷的问题。

众所周知,勘察规范作为重要的技术依据和准则,指引着行业的发展方向,规范和保障着技术人员的从业行为,对技术方案的制订起着重要的指导作用,因此,为规范定向钻探在勘察领域的应用,促进定向勘察技术的发展,相关规范的制定是迫在眉睫的任务。

5 结论与建议

在建筑密集区域,定向勘察使用大功率钻探设备、螺杆钻具及随钻测量系统,通过轨迹控制技术远距离开孔绕避地面障碍物,沿隧道设计轴线一定范围内进行了连续勘探,同时在隧道上方成功实施2个羽状分支孔;采用提钻取心工艺对全部区段进行间隔取心,并根据现场情况完成孔内物探测试。沿隧道设计轴线连续钻进减少了无效钻探的同时提高了勘察精度,钻探和物探的相互验证保证了成果的可靠性,项目的成功实施,证明定向钻进技术是复杂城区隧道勘察的一种有效手段。

可控轨迹定向钻探技术具有长距离轨迹可控、场地适宜性强、钻孔利用率高、周边环境影响小的优势,可以破解复杂环境对地面条件的制约,在建筑密集区、复杂水域、陡峻山区等传统钻探实施困难的情况下均有较强的可实施性,但本案例也显示出定向钻探技术复杂、控制难度大、人员水平要求高等固有特点。另外,定向钻探在勘察工程中的使用尚无规范做出明确规定。因此,应根据勘察领域的要求和特点,制定明确可行的技术原则和规范,并不断完善设备工艺,提升定向勘察技术的自动化、智能化水平,以促使定向勘察技术更广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] 赵丁选,杨力夫,李锁云,等.国内外非开挖定向钻机及其智能控制技术[J].吉林大学学报(工学版),2005,35(1):44-48.
ZHAO Dingxuan, YANG Lifu, LI Suoyun, et al. State-of-the-art of no-dig directional drillers and their intelligent control[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005,35(1):44-48.
- [2] 窦斌,蒋国盛.我国非开挖施工技术的发展概况及差距[J].岩土工程界,2001(4):47-48.
DOU Bin, JIANG Guosheng. Developpment Situation and prospect of trenchledd technology in our country [J]. Geotechnical Engineering World, 2001(4):47-48.
- [3] 郭兵,黄家骏.定向钻进过程的智能化控制技术研究与应用[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(4):47-51.
GUO Bing, HUANG Jiajun. Research and application of intelligent control in the process of directional drilling[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011, 32(4):47-51.
- [4] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与进展[J].地质与勘探,2022,58(5):1082-1090.
ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. Geology and Exploration, 2022,58(5):1082-1090.
- [5] 马保松,程勇,刘继国,等.超长距离水平定向钻进技术在隧道精准地质勘察的研究及应用[J].隧道建设,2021,41(6):972-978.
MA Baosong, CHENG Yong, LIU Jiguo, et al. Tunnel accurate geological investigation using long-distance horizontal directional drilling technology [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6):972-978.
- [6] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and r & d trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):1-8.
- [7] 刘郡.水平定向钻进取心钻具关键技术研究[J].科学技术创新,2022(5):131-135.
LIU Jun. Research on key technology of horizontal directional coring tools [J]. Scientific and Technological Innovation in formation, 2022(5):131-135.
- [8] 吴金生,黄晓林,蒋炳,等.水平绳索随钻定向钻进技术研究与进展[J].煤田地质与勘探,2021,49(5):260-264,271.
WU Jinsheng, HUANG Xiaolin, JIANG Bing, et al. Research and application of horizontal wire-line directional deviation correction while drilling [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5):260-264,271.
- [9] 王尔林,陈元朋,赵泉,等.定向钻进工艺技术轨迹控制偏差分析[J].能源科技,2020,18(7):39-42.
WANG Erlin, CHEN Yuanpeng, ZHAO Quan, et al. Analysis of deviation in trajectory control in directional drilling technology [J]. Energy Science and Technology, 2020,18(7):39-42.
- [10] 李智鹏,易先中,陶瑞东,等.定向滑动钻进控制新方法研究[J].石油钻探技术,2014(4):59-63.
LI Zhipeng, YI Xianzhong, TAO Ruidong, et al. New control

- approach directional slide drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014(4):59-63.
- [11] 董智杰. 复杂地层下水平定向钻施工技术[J]. 水科学与工程, 2019(1):80-83.
- DONG Zhijie. Brief discussion on horizontal directional drilling construction technology under complicated stratum[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2019(1):80-83.
- [12] 陈晓林, 胡汉月, 刘志强, 等. 《定向钻探技术规程》行业标准解读及推广应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(8): 24-27.
- CHEN Xiaolin, HU Hanyue, LIU Zhiqiang, et al. Interpretation and application of the industry standard "Technical Specification For Directional Drilling" [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(8):24-27.
- [13] 黄才启. 定向钻孔轨迹变化规律研究与动态设计方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(5):15-19, 56.
- HUANG Caiqi. Study on directional borehole trajectory and the dynamic design [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(5):15-19, 56.
- [14] 徐正宣, 刘建国, 吴金生, 等. 超深定向钻探技术在川藏铁路隧道勘察中的应用[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2):21-29.
- XU Zhengxuan, LIU Jianguo, WU Jinsheng, et al. Application of ultra-deep directional drilling technology in the investigation of Sichuan-Tibet railway tunnel[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2):21-29.
- [15] 孟宪亮. 长距离定向钻进技术在巷道掘进超前探查中的应用研究[J]. 能源科技, 2020, 18(2):26-29.
- MENG Xianliang. Application study of long-distance directional drilling technology in leading exploration of roadway tunneling[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(2):26-29.
- [16] 张恒春, 刘广, 吴纪修, 等. 川藏铁路3000 m水平定向钻井技术方案[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11):1-6.
- ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan-Tibet railway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(11):1-6.
- [17] 刘春香, 史继彪, 朱元武. 轨道交通工程长水平勘察孔施工技术[J]. 勘察科学技术, 2017(2):37-40.
- LIU Chunxiang, SHI Jibiao, ZHU Yuanwu. Construction technology of long horizontal survey hole for rail traffic engineering [J]. Site Investigation Science and Technology, 2017(2):37-40.
- [18] 赵建国, 赵江鹏, 许超, 等. 煤矿井下复合定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4):202-206.
- ZHAO Jianguo, ZHAO Jiangpeng, XU Chao, et al. Composite directional drilling technology in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4):202-206.
- [19] 隆东, 李杰, 向军文. 物探与水平定向钻进在工程勘察取心中的结合应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(12):42-44.
- DONG Long, LI Jie, XIANG Junwen. Combinative application of geophysical prospecting and horizontal drilling in engineering survey sampling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(12):42-44.
- [20] GB 50307—2012, 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].
- GB 50307—2012, Code for geotechnical investigations of urban rail transit[S].
- (编辑 荐华)