

地铁盾构区间地质勘察技术研究

刘欣 李建国 权伟 姜在明 张秀星

中国电建市政建设集团有限公司 天津 300384

【摘要】：伴随城市轨道交通网络化建设持续推进，盾构法已成为地铁隧道施工的主流工艺。地质条件是决定盾构施工安全、效率与成本的核心控制因素，地质勘察则是盾构工程前期工作的关键技术环节。本文系统阐述地铁盾构区间地质勘察的必要性，明确地勘的工程价值；梳理涵盖资料收集、现场踏勘、方案编制、原位测试、室内试验、报告编制的全流程勘察体系；对传统物探、新型物探、钻探等各类勘察技术的原理、适用条件与优缺点进行对比介绍；结合典型工程案例分土质、砂卵石、软硬不均、富水断层等复杂地层的勘察要点与风险防控对策；指出智能化、自动化、多技术融合、三维地质建模是未来勘察技术的发展方向。研究表明，精细化、多手段、全过程的地质勘察可显著降低盾构涌水、坍塌、刀盘磨损、地面沉降等风险，优化设备选型与施工参数，节约工程投资并减小环境扰动。本文成果可为地铁盾构区间地质勘察方案设计、现场实施与风险管控提供理论参考与技术依据。

【关键词】：地铁盾构；盾构区间；地质勘察；施工安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.036

1 引言

近年来，我国城市轨道交通建设进入高速发展期，盾构法因具有施工速度快、对周边环境影响小、作业安全等优点，在地铁隧道工程中得到广泛应用。盾构施工对地层条件高度敏感，地层岩性、地下水、不良地质体、岩土物理力学参数等对盾构机选型、掘进参数设定、地表沉降控制、施工安全等均有直接影响。国内外大量工程实践表明，因地质勘察精度不足引发的卡盾、涌水涌砂、地表塌陷等事故频发，造成工期延误、经济损失等后果。

现行《城市轨道交通岩土工程勘察规范》、《盾构法隧道施工与验收规范》等对盾构区间勘察提出明确要求，但传统勘察手段在复杂城市环境下，仍存在分辨率不足、深度有限等问题。为此，本文结合工程实践，系统研究地铁盾构区间地质勘察技术体系，对提升勘察质量、保障盾构施工安全高效具有重要理论意义与工程应用价值。

2 地铁盾构施工地质勘察的必要性

2.1 保障盾构施工安全

盾构掘进面临软土流变、砂层液化、孤石、溶洞、高承压水等多重地质风险。地层自稳能力差、渗透性高、强度不均易引发开挖面失稳、涌水涌砂、地面塌陷。精准勘察可提前获取地层分层、岩土参数、地下水、不良地质体分布，为风险评估、支护设计、掘进控制、应急预案制定提供依据，避免因地质不明导致刀具崩裂、刀盘严重磨损、螺旋机喷涌、盾构被困等安全事故。

2.1.1 支撑盾构机科学选型

盾构机的选型直接关系到施工的效率和质量，而地质条件是盾构机选型的决定因素。软土地区宜采用土压平衡盾构；富水砂层、卵石层宜选用泥水平衡盾构；上软下硬、含孤石岩层

宜采用复合式盾构并配置强化刀盘与破碎装置。勘察结果直接决定刀盘形式、刀具配置、密封系统、渣土改良体系、保压系统的设计选型。若地质勘察不准确，盾构机选型不当，可能导致盾构机在施工过程中出现刀盘磨损严重、掘进困难、密封失效等问题，不仅影响施工进度，还会增加施工成本。

2.1.2 有效控制工程投资与工期

地质不确定性是导致设计变更、方案调整、额外处置措施的主要原因。北京地铁某区间在施工过程中，发现实际地质情况与勘察报告不符，地层中存在大量孤石，需要进行爆破或破碎处理，这不仅增加了施工难度和安全风险，还导致工程成本增加了数千万元。而在南京地铁某新区间勘察中，通过“钻探+地质雷达”联合勘察，提前探明12处孤石，采用盾构机预配置岩石破碎机，避免了额外工程变更，成本节约超800万元。通过精细化勘察提前探明孤石、软弱夹层、溶洞等，可优化线路、预先处理、合理配置设备与资源，显著节约投资、缩短工期。

2.1.3 减少对周边环境的扰动

地铁盾构多穿越建成区，周边建筑、管线、轨道交通、河道等对沉降敏感。地质勘察能够为设计和施工提供详细的地层变形参数、地下水条件、管线分布等，指导制定合理的施工方案，实施有效的环境保护措施，降低对周边环境的影响。在穿越建筑物密集区域时，合理控制盾构机的推进速度、出土量和注浆量，减少地面沉降，保护周边建筑物的安全；在穿越地下管线区域时，准确掌握管线的位置和走向，采用“低推力+慢转速”掘进模式，避免对管线造成损坏。将地表沉降、管线变形、建筑倾斜控制在允许范围内，实现安全环保施工。

3 地质勘察标准流程

3.1 资料收集与分析

在地质勘察工作开展前,需全面收集与勘察区域相关的地形地貌资料、已有勘察报告、设计文件、水文地质资料等。通过对资料的深入分析,初步了解目标勘察区域的地质概况,为后续的现场勘查工作提供指导。

3.2 现场踏勘

现场踏勘是地质勘察不可或缺的环节,需由盾构技术人员与钻探施工人员共同参与完成地形地貌核实、地下障碍物调查、环境条件记录、不良地质现象识别等工作。

3.3 制定勘察方案

在收集资料和现场踏勘的基础上,制定科学合理的勘察方案至关重要。勘察方案需根据勘察区域的地质复杂程度、工程规模等因素,在满足规范要求的情况下确定勘察方法和勘察工作量。对于地质条件复杂、存在不良地质现象的区域,需要加密勘察点,采用多种勘察方法相结合的方式,确保能够全面、准确地掌握地质情况。勘察方案还应明确勘察进度安排,合理分配人力、物力资源,确保勘察工作能够按时、高效完成,提前具备相关质量控制、安全保障措施。

3.4 原位测试与采样

原位测试是获取岩土体在天然状态下物理力学性质的重要手段。常见的原位测试方法包括标准贯入试验、静力触探试验、十字板剪切试验、旁压试验等。在原位测试的同时,还需要采集岩土样品,用于室内试验分析。采样时要确保样品的代表性和完整性,采用合适的采样方法和器具,避免样品受到扰动。对于土样,通常采用薄壁取土器进行采取;对于岩样,要选择具有代表性的部位进行钻取。采集的样品需及时封装、标识,并妥善运输至实验室进行试验。

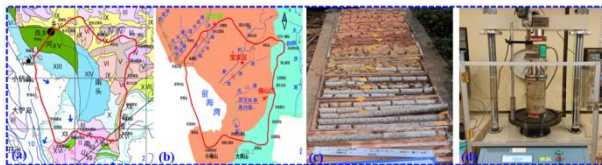


图1 深圳某地铁线路部分地质勘察工作(a)地貌图、(b)水系图、(c)钻孔芯样、(d)岩芯抗压强度试验。

3.5 室内试验

室内试验是对现场采集的岩土样品进行详细分析的过程。通过一系列试验,能够准确测定岩土的各项物理力学性质指标。土工试验包括含水量、密度、比重、液塑限、压缩性、抗剪强度等测试。岩石试验包括岩石的抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比等测试。这些指标对于评价岩石的强度和稳定性,为盾构施工提供重要的设计参数。

3.6 资料整理与报告编制

将原位测试数据、室内试验结果进行汇总整理,绘制地质剖面图、柱状图、等厚线图、水位图、三维地质模型等,直观展示勘察区域的地层结构、岩土特性等信息。在分析过程中,要综合考虑各种因素,对地质条件进行全面、客观地评价,预测可能出现的岩土工程问题,为后续的盾构施工提供有力的技术支持。

4 主要地质勘察技术方法

4.1 传统物探技术

4.1.1 地质雷达

地质雷达利用高频电磁波在地下介质中的传播特性来探测地质结构。其工作原理是通过发射天线向地下发射电磁波,当电磁波遇到不同介质的分界面时,会发生反射和透射,接收天线接收反射回来的电磁波信号,通过分析信号的特征,如波形、振幅、频率等,来推断地下地质体的位置、形状和性质,如图2所示。地质雷达具有分辨率高、探测速度快等优点,通常可用于探测地下管线、人防工程等障碍物,为盾构施工提供重要信息。但地质雷达的探测深度和精度受多种因素影响,如天线频率、介质的导电性和介电常数等。

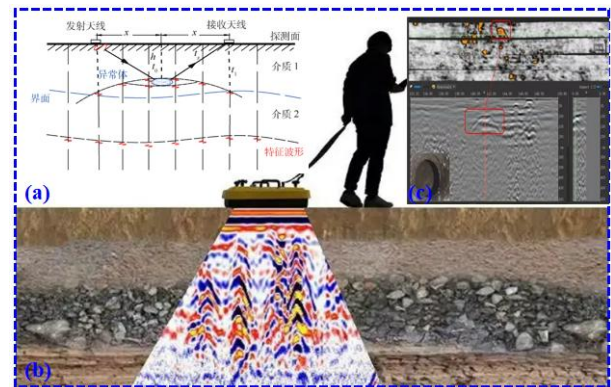


图2 地质雷达勘察示意图(a)工作原理图、(b)工作示意图、(c)测试成果图

4.1.2 高密度电法

高密度电法是一种阵列式电法勘探方法,通过在地面布置多个电极,向地下供入电流,测量不同电极间的电位差,从而获取地下介质的电阻率分布信息。根据电阻率的差异可以划分地层、探测地质异常体,具体勘察原理如图3所示。高密度电法具有数据采集量大、工作效率高、勘探深度范围广等优点,能够较好地反映地下地质结构的变化情况,可用于探测地下溶洞、土洞的分布。但高密度电法的数据处理和解释较为复杂,需要专业的技术人员进行操作,同时要结合地质资料和其他勘察方法进行综合分析,以提高解释结果的准确性。

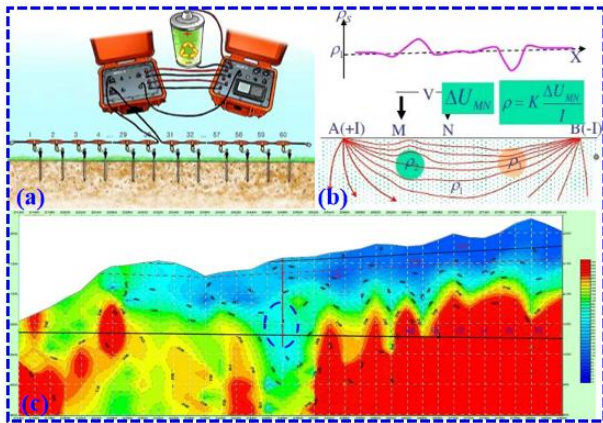


图3 高密度电法勘察示意图(a)工作原理图、(b)电流分布理论图、(c)测试成果图

4.1.3 地震波法

地震波法通过人工激发地震波,根据其在地下介质中的传播规律来探测地质结构的方法。根据地震波的传播速度、振幅、频率等特征,可以推断地下地层的岩性、厚度、界面位置等信息。常见的地震波法包括反射波法、折射波法和面波法。反射波法适用于探测地下较浅部位的地质结构,通过接收反射回来的地震波信号,分析地层的反射界面,确定地层的分布情况。折射波法主要用于探测深部地层结构,利用地震波在不同介质分界面上的折射现象,获取地层的信息。面波法对浅层地层的不均匀性较为敏感,可用于探测地下空洞、软弱夹层等地质异常体。地震波法的勘探效果受激发条件、地震波传播路径和接收仪器等多种因素的影响,在实际应用中需要合理选择激发方式和接收参数,以提高勘探精度。

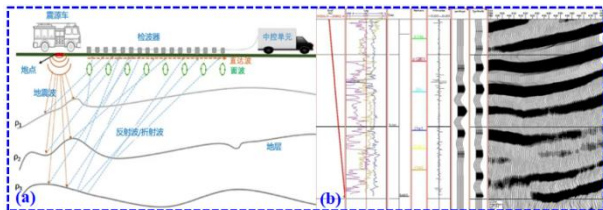


图4 地震波法勘察示意图(a)工作原理图、(b)勘察分析图

4.2 新型物探技术

4.2.1 微动探测法

微动探测法通过在地面布置多个检波器,接收来自大气扰动、交通振动等天然源产生的微动信号,分析信号的频散特性,从而反演地下介质的波速结构与分层信息。不同岩土体的密度、完整性不同,其对应的振动波传播速度存在明显差异,根据波速差异可划分地层界面、识别地下空洞或软土夹层,勘察原理如图5所示。微动探测法具有非破坏性、无需人工激发信号等优点,能够准确圈定地下浅部断层、溶洞的分布范围。但其探测结果易受地表干扰源(如重型车辆、施工噪音)影响,

且对地下小尺度异常体分辨率较低,需结合地质钻探数据进行验证校正。

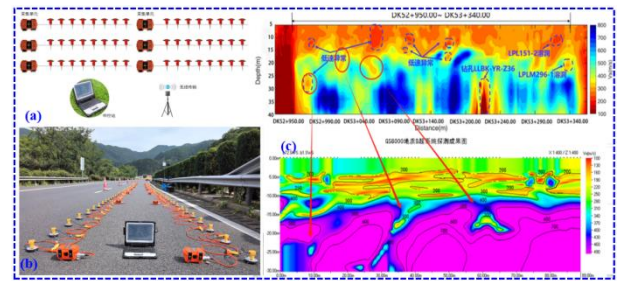


图5 微动探测法勘察示意图(a)工作原理图、(b)现场勘察图、(c)数据对比图

4.2.2 高能宇宙线探测法

高能宇宙线探测法是利用宇宙射线与大气相互作用产生的缪子粒子进行深层地质探测的方法,通过在地下工程内部或地面布置缪子探测器阵列,记录穿透地下介质的缪子通量与运动方向,利用缪子强穿透力及不同密度介质对缪子的衰减差异,反演地下介质的密度分布特征,具体探测原理如图6所示。高能宇宙线探测法具有探测深度大、不受电磁干扰、能探测隐蔽性深层结构等优点,可用于深埋盾构隧道的深层地质探测。但高能宇宙线探测法的设备成本高、数据采集周期长,且对小尺度地质异常体分辨率较低。

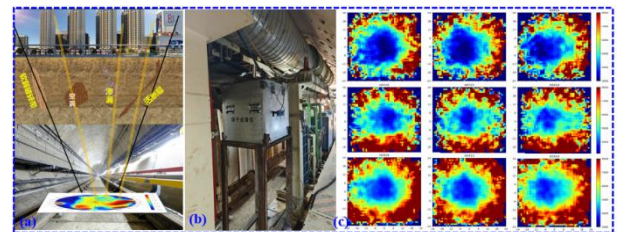


图6 高能宇宙线探测法示意图(a)工作原理图、(b)现场勘察图、(c)勘察成像图

4.3 钻探技术

钻探技术是地质勘察中最常用的方法之一,通过钻探获取岩芯和土样,直观了解地层结构和岩土特性。钻探设备类型多样,常见的有回转钻机、冲击钻机、振动钻机等。回转钻机适用于各种地层,通过回转钻头切削岩土进行钻进,能够获取较为完整的岩芯和土样,对于研究岩石的结构、构造和岩土的物理力学性质具有重要意义。冲击钻机则主要用于钻进坚硬的岩石地层,利用冲击器的冲击力破碎岩石,推进钻孔。振动钻机适用于松散地层,通过振动使钻杆周围的土体液化,从而实现快速钻进。在实际应用中,可根据不同的地层条件选择合适的钻探设备。钻探过程中,要严格控制钻进参数,如转速、钻压、进尺等,确保钻探质量。同时,要做好岩芯和土样的采集、保存和标识工作,以便后续进行室内试验分析。

5 地质勘察技术发展趋势

5.1 智能化与自动化

随着人工智能、大数据、物联网等技术的飞速发展，地质勘察技术正朝着智能化与自动化方向迈进。智能化勘察设备能够自动采集、处理和分析地质数据，提高勘察效率和精度。利用智能传感器实时监测岩土体的物理力学参数变化，通过数据分析模型快速准确地判断地质条件。自动化钻探设备可以根据预设程序自动完成钻孔、采样等操作，减少人工干预，同时提高钻探质量的稳定性。

5.2 多技术融合

单一的地质勘查技术往往存在局限性，难以全面、准确地掌握复杂地质条件。因此，多技术融合成为地质勘察技术发展

的重要趋势。将钻探技术与物探技术相结合，通过钻探获取的岩芯和土样信息，验证和校准物探数据，提高物探分析的准确性；同时，利用物探技术大面积探测的优势，指导钻探工作的布置，提高钻探效率。

6 总结

地铁盾构区间地质勘察是保障施工安全、优化施工方案、控制工程成本、减少环境影响的必要环节。本文从勘察的必要性、流程、主要技术方法及未来发展趋势等方面进行了系统论述，强调了地质勘察在盾构施工中的核心作用。随着技术的不断进步，智能化、自动化、多技术融合将成为未来地铁地质勘察的重要发展方向，为城市轨道交通建设提供更加科学、精准、高效的技术保障。

参考文献：

- [1] 王卫东,吴江斌,王向军.复杂场地盾构区间隧道块石探查和处理技术[J].铁道工程学报,2024,41(7):45-50.
- [2] 周敏,王卫东,翁其平.盾构机选型与地质适应性匹配方法研究[J].土木工程学报,2021,54(7):110-118.
- [3] 赵勇,李术才,李利平.微动探测与高能宇宙线探测在盾构深层地质勘察中的应用[J].岩土力学,2024,45(4):1029-1038.
- [4] 刘辉,张顶立,房倩.地铁盾构区间三维地质建模技术及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊 1):3067-3076.