

海底隧道工程地质综合勘察技术研究

陈亨庄*

(福建省地质工程勘察院,福州 350002)

摘要:本文以深圳湾海底隧道工程为例,详细探讨了工程地质综合勘察技术在海底隧道建设中的应用。通过地质调绘、海底地形测量、多道三维地震反射物探技术、海域勘探及岩土测试等手段,全面分析了工程区域的地质构造、地层岩性、水文地质条件等特征。研究解决了深海作业难度大、地质条件复杂多变等勘察难点,为海底隧道工程的安全稳定设计与施工提供了科学依据,对类似工程具有借鉴意义。

关键词:海底隧道;工程地质;综合勘察;三维地震反射

中图分类号:X321.7

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2024)11-0054-7

0 引言

海底隧道作为连接水域两岸的重要交通设施,在促进区域经济发展、加强地区间交通联系方面发挥着至关重要的作用。然而,其工程地质条件的复杂性和不确定性给设计与施工带来了巨大挑战^[1]。海底地质环境往往涉及复杂的岩层结构、潜在的地质断层、软土地基以及高水压等多重因素,这些都可能对隧道的稳定性和安全性构成严重威胁。

为确保海底隧道工程的安全与稳定,必须进行全面而深入的综合勘察^[2]。近年来,随着科技的进步和工程地质勘察技术的不断发展,国内外学者和工程师在海底隧道工程地质勘察方面取得了显著进展。国内方面,众多研究聚焦于高精度地质勘探技术的应用^[3],如多道三维地震反射技术、地质雷达探测技术以及钻探与取样技术的优化等^[4],以期更准确地揭示海底地质结构特征。国外研究则更多地关注于跨海域工程地质条件的对比分析、海底隧道长期稳定性评估方法^[5],以及基于大数据和人工智能的地质风险预测模型等前沿领域。

本文依托某海底隧道工程实例,详细探讨了工程地质综合勘察技术的应用,特别是多道三维地震反射等先进技术。通过实例分析,旨在揭示

这些技术在实际工程中的应用效果和价值,为类似工程提供借鉴与参考。同时,本文也期望通过这一探讨,进一步推动海底隧道工程地质勘察技术的发展,确保海底隧道工程的顺利实施与长期安全运行。

1 工程概况和主要工程地质特征

1.1 工程简介

本研究以深圳湾海底隧道工程为例,该工程起于前海妈湾港区的妈湾大道与月亮湾大道交叉处,终于宝安大铲湾片区沿江高速大铲湾收费站及金湾大道-西乡大道交叉口,线路全长8.05km,如图1所示,处于珠江口东岸的亚热带季风气候区,年平均气温约22℃,年降水量约为1800mm。隧道主体结构采用直径约为15m的盾构法施工,并配备通风、照明、消防等安全设施,两端设有人工岛,岛上建有收费站、服务区等配套设施。此外,该海底隧道不仅满足日常交通运输需求,还具备战略疏散功能,其建设将极大地带动周边地区的经济发展,并提升城市形象。

1.2 区域地质背景

深圳湾海底隧道所处的区域地质构造复杂,地层岩性多样。根据前期地质调查资料,该区域的地层主要由第四纪沉积物组成,包括粘土、粉



图1 深圳湾海底隧道工程地理图

砂、中粗砂及砾石等。其中,粘土层厚度较大,具有一定的压缩性和不稳定性;粉砂和中粗砂层则较为松散,易发生液化现象。此外,局部地区还存在少量的基岩出露。

地震活动方面,虽然深圳湾不属于高烈度地震区,但历史上曾发生过多中强震,因此抗震设计需考虑相应的设防标准。

水文地质条件方面,深圳湾海域虽然受潮汐作用影响显著,海水深度变化较大,但在描述其水文地质特性时,应重点关注地下水类型及补给方式。该区域由于临近珠江,地下水可能受到珠江径流的补给,且海底沉积物中含有较多细颗粒物,这可能对地下水的流动和存储条件产生一定影响,同时也需要注意这种地质条件可能带来的海底地形不稳定性问题。不过,具体的水下地质结构和地下水动态还需进一步的专业勘查和研究确定^[6]。

1.3 主要工程地质特征

深圳湾海底隧道工程的主要工程地质特征表现为地质构造复杂、岩石类型多样以及水文地质条件特殊。具体而言,隧道穿越区域的地质构造主要包括断层破碎带和褶皱构造,这些构造的存在增加了施工难度和风险。岩石类型方面,除了上述提到的第四纪沉积物外,还有部分区域分布有花岗岩等硬质岩石,这对盾构机的选型和掘进速度提出了更高要求。水文地质条件方面,受

海底沉积物的不均匀性以及潮汐作用的影响,可能导致海底地形发生变化,进而影响隧道的稳定性和安全性。

2 工程地质综合勘察

2.1 勘察重难点分析

2.1.1 勘察重点

深圳湾海底隧道工程勘察的重点主要集中在以下几个方面:首先,需详细查明隧道穿越区域的土岩复合地层空间结构,特别是岩石的分布、风化差异和完整性、强度和耐磨性等。其次,要详细查明各地层的水文地质参数,包括地下水的补给、径流、排泄条件以及水力联系。最后,还需准确获取洞身第四系地层及特殊岩土的地层参数,如土层厚度、密实度、承载力等^[7]。

2.1.2 勘察难点

深圳湾海底隧道工程的勘察过程中,面临诸多技术难题和挑战。首先,海域环境复杂多变,水深流急,且夏秋之际易受热带风暴(台风)侵袭,增加了勘探实施的难度。其次,深圳湾海域是重要的交通航道,因此,在选择勘探方法、设备及平台时需要提出更高要求。再次,地质条件复杂,隧道穿越区域地质构造复杂,断层破碎带和褶皱构造发育,使得物探与钻探方案的优化组合变得困难。最后,海底沉积物的不均匀性和潮汐作用的影响增加了勘察的不确定性和难度。

2.2 综合勘察技术应用

2.2.1 地质调绘与海底地形测量

在深圳湾海底隧道工程的综合勘察初期,地质调绘与海底地形测量扮演了至关重要的角色。我们参考了现有区域地质资料,并融合遥感解译技术,对山岭隧道及周边海域环境开展了细致入微的调查工作。这一过程中,着重把握海底的地形地貌特征,以及可能存在的障碍物情况,这些信息对于后续隧道方案的设计具有决定性意义。同时,它们也为勘探点的布置和作业平台的选择提供了科学依据^[8]。

为精确测量海底地形,采用了侧扫声呐技术。该技术通过拖船拖曳包含声呐探测装置的拖鱼沿预定航迹线航行,利用声波的反射时间和强度来探测海底的地貌或障碍物。然而,侧扫声呐的测量精度会受到多种因素的影响,如拖鱼定位误差和背景噪声(包括水流、折射、风浪、生物等)。为了消除这些误差,引入超短基线定位系统,如图 2 所示,该系统由发射基阵、应答器、接收基阵构成,通过计算声单元的相位差,可以得到拖鱼与目标的相对方位角。同时,利用声速与声波传播时间可以算出拖鱼与水下目标的距离。再结合声速剖面进行波束线校正,就可以准确计算出拖鱼的位置,从而确保海底地形测量的高精度。

在获取海底地形数据后,结合地质调绘成果进行综合分析。通过对比地质构造、地层岩性等信息,进一步细化勘探布置方案,为后续的勘探工作提供了有力的数据支持。这种综合地质成

果分析的方法,不仅提高了勘察效率,还确保了勘察结果的准确性和可靠性。

2.2.2 物理勘探

在深圳湾海底隧道工程的综合勘察中,多道三维地震反射物探技术作为一项先进的物理勘探手段,发挥了至关重要的作用。该技术通过在水域布置多条测线,利用地震波在水下地层中的传播和反射特性,获取地层结构的三维空间信息。其核心原理是基于地震波的传播和反射,当地震波遇到不同地层界面时,会发生反射和折射现象。通过记录这些反射波的传播时间和强度,可以推断出地层界面的位置和性质。在三维勘探中,通过在测区水域内布置若干条相互交叉的测线,形成一个三维的数据采集网络,从而获取地层结构的三维空间特征。

多道三维地震反射物探技术的主要设备配置包括高能量声波脉冲的震源(气枪或电火花)、多条拖缆及水听器接收器、高精度导航系统(如 GPS 和声纳系统)以及高性能计算机和专业软件。数据处理流程涵盖数据采集、噪声去除和波形校正等预处理、通过偏移算法将二维数据转换为三维数据体、利用专业软件进行数据解释以识别地质构造,并最终通过建模软件生成直观展示地下结构的简单二维地质模型。如图 3 所示,在深圳湾海底隧道工程中,基岩弱风化面整体呈现出典型的潜山特征。其纵横向变化剧烈,山峰与山谷之间的高差超过 100m。在 DK21 至 DK25 段线路中,有四次穿越了这种基岩面潜山地形。

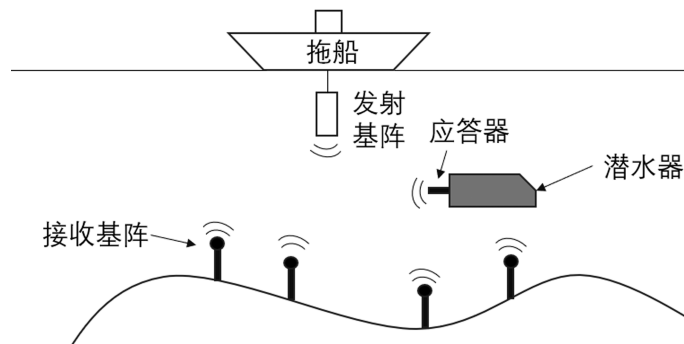


图 2 超短基线定位系统

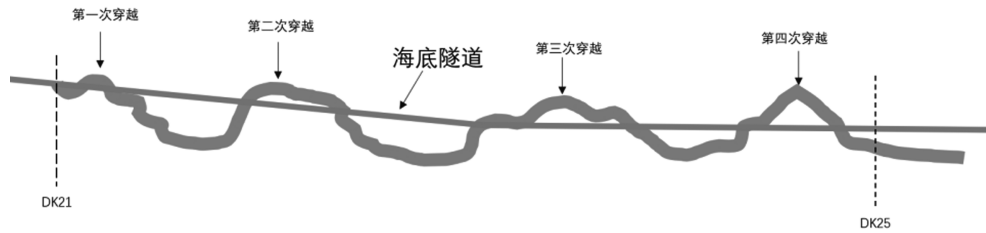


图3 DK21至DK25段线路中的穿越潜山地形的二维地质模型

在深圳湾海底隧道工程中,采用了单缆(48道)加密采集方案,按一炮一束线采集,炮距2m,道距2m,线距10m。设计每个工区纵向测第29线以上,横向按道距不少于1001线。通过对测区内100至120m深度的三维地震均方根振幅水平切片分析,如图4所示,发现均方根振幅能追踪地层的地震属性异常,识别出5处条带状强振幅变化区,判定为断层构造破碎带。

以三维地震物探数据为核心,构建地质模型,并融合钻探、静探等多种勘探数据对其进行约束和优化。这一综合勘探方法促进了数据间的融合,提升了地质的综合解读能力,不仅指导了勘探孔位的精准布局,还增强了地质分析的全面性和准确性。

2.2.3 海域勘探及平台选择

深圳湾海底隧道工程的海域勘探需精选方法和平台,以应对复杂环境。常用勘探方法如机动钻探和海上静力触探,受风浪、潮汐及通航影响,实施难度大。勘探平台有漂浮式和固定式两

种,前者适用于深水但稳定性差,后者定位精确且稳定,特别是自升式平台能提供陆域作业环境,提高勘探精度,但适应水深有限且转场慢。选择时需综合考虑工程实际条件。

综合考虑深圳湾海底隧道工程的实际情况,采用多种平台优势互补的作业方式。在近海岸附近勘探时,选用了桁架式平台;在水深较浅区域或需要进行综合测试时,则采用了自升式平台;而在其余海域,则主要采用了船式平台。通过这种多平台组合的方式,不仅有效保证了勘探质量和工期,还提高了勘探的灵活性和适应性。采用自升式海上勘探平台实施海上静力触探测试,并与相邻机动钻探结果对比,显示地层结构与岩土状态高度一致。

实践证明,海上静力触探适用于第四系地层勘探,能精准获取原位地层参数,且作业时间较机动钻探大幅缩短,有效提升了勘探效率。针对隧道穿越第四系地层区域,建议增加静力触探的应用比例。

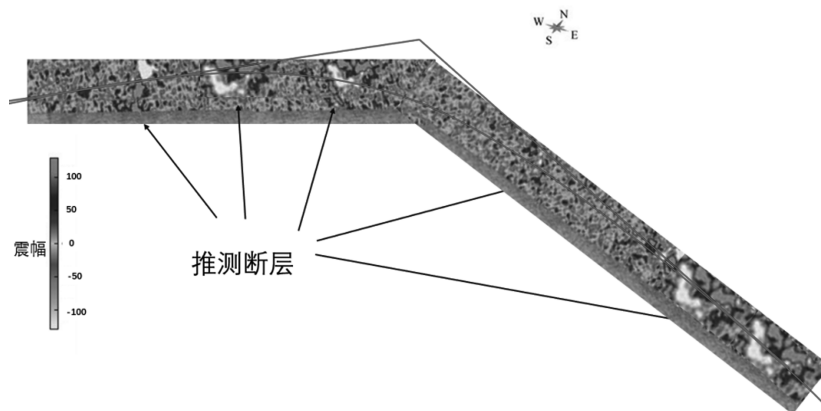


图4 三维地震的均方根振幅水平切片图

2.2.4 岩土测试与试验

在深圳湾海底隧道工程的综合勘察中,岩土测试与试验是关键环节,严格遵循行业标准与规范。海域原位测试主要采用标准贯入试验和动力触探试验,结合勘探孔内的综合测试项目,全面评估岩土体的物理力学性质和动力学特性,评估结果为:标准贯入试验击数小于 20N 和动力触探试验指标小于 85,均符合项目测试指标要求。同时,通过代表性钻孔进行的水文地质试验,包括抽水试验和压水试验,如表 1 所示。这些测试多在稳定性好的固定平台上进行,确保数据质量。

表 1 数据显示,通过抽水试验和压水试验,对两个代表性钻孔(HW-01 和 HW-02)进行了深入测试。HW-01 钻孔在 31m 深度处进行了抽水试验,结果显示抽水量为 53 m³/h,渗透系数为 2.5E-04 cm/s,表明该深度岩土层具有一定的透水性。而 HW-02 钻孔在 47m 深度处进行了压水试验,压水量为 366 L/min,渗透系数为 1.8E-04 cm/s,相较于 HW-01 钻孔,其透水性略低。这些数据为隧道防水设计提供了重要参考,有助于工程师准确了解不同深度岩土层的渗流特性,从而制定有效的防水措施。

室内试验方面,进行土样和岩样的多项物理力学试验,如表 2 所示,包括三轴压缩、无侧限抗压强度、冻土试验等,以评估土体和岩石的强度、变形及稳定性。表 2 测试结果显示,三轴压缩试验显示粘土样本 T-01 的强度为 0.51MPa,表明

其在正常固结状态下的承载能力较弱。无侧限抗压试验则揭示了花岗岩样本 U-02 的高强度特性,抗压强度达到 125MPa,属于硬质岩石范畴。而冻土试验针对粉砂样本 F-01,在 -20℃ 条件下测得其冻胀率为 15.1%,这对于评估寒冷地区隧道的稳定性至关重要。

此外,还进行了水样侵蚀性分析,其中,地下水样本 W-01 的水样侵蚀性分析数据为 52 mg/L,评估结果为:对混凝土有轻微侵蚀性。这些试验数据不仅为隧道工程设计提供了详实的地质参数,还直接关联到施工过程中的安全管控和质量控制,是确保工程顺利进行的重要科学依据。

2.2.5 各阶段关键勘探技术要点

深圳湾海底隧道工程综合勘察工作不仅覆盖了从预可研到施工图设计的全周期,还特别强调了在每个阶段逐步加深勘察精度的重要性。除施工阶段的地质工作外,该工程针对铁路海底隧道的独特挑战,在设计各个阶段采取了灵活且针对性的地质勘察策略。预可研阶段主要集中于广泛的资料搜集和初步调查;进入可研阶段后,则通过地质调绘、遥感探测及物理勘探技术,并结合必要的钻探工作,为路线选择与施工方法提供科学依据。初步设计阶段,为了进一步优化隧道布局,会进行更为详细的地质调查,包括更精细的地质绘图、物探数据分析以及规划线路内的密集钻探作业。到了施工图设计阶段,目标是确保所有勘查信息准确无误,因此会采用多种勘

表 1 水文地质试验数据

试验类型	钻孔编号	深度(m)	试验结果	渗透系数(k, cm/s)
抽水试验	HW-01	31	53m ³ /h	2.5E-04
压水试验	HW-02	47	36L/min	1.8E-04

表 2 室内试验数据

试验类型	样本编号	土/岩类型	三轴压缩强度 (MPa)	无侧限抗压强度 (MPa)	冻土试验 (%)	备注
三轴压缩试验	T-01	粘土	0.51	-	-	正常固结
无侧限抗压试验	U-02	花岗岩	-	125	-	硬质岩石
冻土试验	F-01	粉砂	-	-	15.1	-20℃ 条件下

表3 海底隧道各个阶段的关键勘探技术要点

阶段	工作内容
预可研阶段	1. 资料搜集;2. 初步调查
可研阶段	1. 地质调绘;2. 遥感探测;3. 物理勘探技术;4. 钻探工作
初步设计阶段	1. 详细地质调查;2. 精细地质绘图;3. 物探数据分析;4. 规划线路内的密集钻探作业
施工图设计阶段	1. 确保所有勘察信息准确无误;2. 多种勘察手段;3. 根据现场实际情况分段分级深入探索; 4. 获取详尽的地层特性参数

察手段,根据现场实际情况分段分级深入探索,以获取详尽的地层特性参数,从而满足具体的设计和施工要求。整个过程中,项目团队注重勘探工作的有序安排与合理布局,强调新旧数据之间的综合分析及不同探测技术间的相互验证,适时调整钻探计划,旨在保证勘查活动既高效又安全地进行。海底隧道各个阶段的关键勘探技术要点如表3所示。

3 结论

深圳湾海底隧道工程地质综合勘察中,多道三维地震反射物探技术与钻探、静探等多种方法相结合,展现了显著优势。三维地震技术为地质模型构建提供了核心数据,钻探与静探则有效验证了物探成果,并细化了地层参数。实践表明,这种综合勘察方法提高了勘察精度与效率,为隧道设计与施工提供了可靠依据。未来,应继续优化勘察技术组合,确保海底隧道工程的安全与稳定。

参考文献(References):

- [1] 孙元春,陈则连,尚海敏. 渤海海峡跨海通道工程地质条件初步分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(06): 1898 - 1906.

- [2] 李凯. 水域工程高精度三维地震反射勘探应用研究[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(04): 1670 - 1686.
- [3] 刘文龙. 侧扫声呐技术在海洋测绘中的应用[J]. 珠江水运, 2024, (15): 16 - 18.
- [4] 孙红林,胡清波,刘铁,等. 三维地震反射法在海底隧道勘察中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(06): 18 - 23.
- [5] 黄晓波,徐伟,王春颖,等. 渤海海域明下段早期区域沉积格局及其勘探意义[J]. 中国海上油气, 2024, 36(04): 59 - 71.
- [6] 袁真秀. 乌兹别克斯坦卡姆奇克隧道工程勘察技术创新[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(06): 216 - 217.
- [7] 田静. 综合勘察技术在岩土工程勘察中的应用分析[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(07): 88 - 91.
- [8] 王亚飞. 金塘海底隧道工程地质综合勘察技术研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(12): 30 - 37.

作者简介:

第一作者/通讯作者:陈亨庄,1970年生,男,福建闽清人,福建省地质工程勘察院,高级工程师,主要研究方向为水文地质工程地质。Email:3319185388@qq.com

Research on Comprehensive Survey Technology of Engineering Geology for Undersea Tunnel

CHEN Hengzhuang*

(Fujian Geological Engineering Survey Institute, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Taking Shenzhen Bay undersea tunnel project as an example, this paper discusses the application of comprehensive survey technology of engineering geology in the construction of undersea tunnel in detail. Through geological mapping, seabed topographic survey, multi-channel 3D seismic reflection geophysical exploration, sea area exploration and geotechnical testing, the geological structure, stratigraphic lithology, hydrogeological conditions and other features of the project area are analyzed comprehensively. The research solves the deep-sea operation, complex and changeable geological conditions and other exploration difficulties, which provides a scientific basis for the safe and stable design and construction of submarine tunnel engineering, and references for similar projects.

Key words: undersea tunnel; engineering geology; comprehensive survey; Three-dimensional seismic reflection