

青岛地铁8号线复杂环境长大过海隧道设计关键技术

吴昊

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津//高级工程师)

摘要 目的:地铁长大区间海底隧道穿海距离长,地质条件和海域环境较为复杂,其设计难度大、施工风险高,可参考工程案例及施工经验匮乏,应对地铁长大过海区间土建、通风防灾、给排水及消防等设计关键技术进行深化研究。方法:基于青岛地铁8号线(以下简称“8号线”)海底区间隧道的工程概况、地质条件、海域环境及设计标准,对盾构法、矿山法、沉管法和堰筑明挖法等4种施工方法进行比选。在确定施工方法的基础上,进一步对该工程穿越大型海底断层破碎带施工、泥水盾构在海底高水压复杂地层中长距离掘进、海域段软弱地层联络通道施工等海底复杂地质情况制定了应对措施,提出了通风防灾、给排水及消防等方面的设计关键技术,并创新性地提出了采用机械顶管法修建海底联络通道、海底高水压饱和气体带压换刀等设计理念。结果及结论:单一施工方法难以满足地铁长大海底隧道复杂多变的地质,可根据不同施工方法对海底地质的应对能力采用组合工法修建海底隧道。

关键词 地铁;长大区间海底隧道;组合工法;矿山法;盾构法;机械顶管法

中图分类号 U455.4;U459.5;U452.2*5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.031

Key Design Technologies for Qingdao Metro Line 8 Long-large Undersea Tunnel in Complex Environment

WU Hao

Abstract Objective: Metro long-large interval undersea tunnel features long sea-crossing distance complex geological conditions and marine environment. The tunnel design is difficult, construction has high risks, and is in great need of referable engineering cases or construction experiences. Thus it is necessary to carry out in-depth research on key design technologies for the metro long-large undersea interval such as civil engineering, ventilation, disaster prevention, water supply and drainage, and fire protection. Method: Based on the engineering overview, geological conditions, marine environment, and design standards of Qingdao Metro Line 8 (hereinafter referred to as 'Line 8') undersea interval tunnel, four construction methods are compared and selected, including shield tunneling

method, mining method, immersed tube method, and cofferdam open-excavation method. Upon determining the construction method, responsive measures are further formulated according to the complex geological conditions of the seabed, including the construction crossing large undersea fault fracture zones, long-distance excavation in high-pressure and complex stratum using slurry shield tunneling, and the construction of undersea section link passage in soft stratum. Key design technologies in ventilation, disaster prevention, water supply and drainage, and fire protection are proposed. Design concepts are innovatively proposed, including the use of mechanical pipe jacking method to build undersea link passage, and cutter replacement under pressure by undersea high water-pressure saturated gas. Result & Conclusion: It is difficult to deal with the complex and ever-changing geological conditions of metro long-large undersea tunnels by one construction method. It is recommended to adopt different construction methods according to their responsive capabilities to the undersea geological conditions and build undersea tunnel with combined construction plan.

Key words metro; long-large undersea tunnel; combined construction plan; mining method; shield method; mechanical pipe jacking method

Author's address China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

从1965年修建第1条水下隧道——上海打浦路隧道以来,我国已建成逾百座穿江过海隧道^[1],但已建成隧道多为过江过河隧道,长大过海隧道并不多。按使用用途分,过海隧道可分为用于公路、铁路、管道工程和轨道交通等类型的隧道。铁路方面,广深港铁路客运专线狮子洋隧道全长10.80 km^[2],采用盾构法施工,穿越南海珠江口约3.30 km的海域^[3]。公路方面,上海长江隧道全长8.95 km,采用盾构法施工,穿越东海长江口约7.50 km的海域^[4]。管道工程方面,台山核电站取水隧洞(1、2号机组海域)工程采用盾构法施工,穿越南海

大襟岛北侧约 4.06 km 的海域^[5]。地铁方面,青岛地铁 1 号线过海区间隧道(凤凰岛站—团岛站)全长 6.59 km,穿越黄海胶州湾南侧约 3.49 km 的海域;厦门地铁 3 号线过海区间隧道(五缘湾站—刘五店站)全长 4.90 km,穿越东海厦门东部约 3.60 km 的海域^[6]。

按建造方法分,过海隧道可采用盾构法、矿山法、沉管法和堰筑明挖法等施工方法建造,其中:沉管法多用于江河等内河隧道;堰筑明挖法多用于穿湖隧道;矿山法和盾构法的适用范围则较广。过海隧道的设计要求高、施工过程复杂、工程风险高,隧道选址穿海区域通常无可借鉴的工程经验,且海域和陆地环境在水文地质、环保要求及施工作业面可选择范围等方面完全不同,因此过海隧道的建造应在结合其功能用途的基础上,统筹考虑地质条件、海域通航要求,以及隧道对海洋环境影响、建设成本和运营成本等因素,进而确定科学的设计原则和合理的施工方法。相比一般过海隧道,长大过海隧道穿越海域距离长、地质不确定性大、风险持续时间长,各种建设制约因素叠加性强,因此长大过海隧道的建设难度更大。

地铁是一项系统工程,涉及专业数量多,各专业间衔接复杂,建成后的地铁是城市内重要的公共交通客流载体,因此,对地铁工程可靠性的要求非常高。长大过海隧道的距离长,较一般地铁工程隧道更难设计。本文依托青岛地铁 8 号线(以下简称“8 号线”)海底区间隧道的设计与施工实践,详细介绍该长大过海区间土建、通风防灾、给排水及消防等核心专业的设计关键技术。

1 工程概况

1.1 海底区间隧道概况

8 号线大洋站—青岛北站海底区间隧道(以下简称“8 号线海底区间隧道”)穿越黄海胶州湾北侧海域,连接青岛外围经济圈(胶州市及红岛高新技术产业开发区)和青岛主城区。该区间隧道为单洞单线隧道,全长 7 931 m(穿越海域长度为 5 428 m),海域段隧道左右线的间距为 25 m,陆域段隧道左右线的间距为 14 m。8 号线的设计速度为 120 km/h。为满足该区间隧道的施工工期要求,设置了施工斜井 1 座。基于 8 号线的运营需求,该区间隧道共设有 3 处地下风机房及通风竖井、3 处废水泵站,并结合风机房设置了 2 处牵引变电所、2 处独立

降压变电所及其他相关配套设施。此外,为避免 8 号线运营期间因过海区间隧道损坏导致水体危及区间两端其他线路区段这一极端情况的发生,在该过海区间陆域段临近两端车站处均设置了自动控制型平开式防淹门,并在区间两端的车站均设置了防淹门自动控制室。

1.2 场地环境及地质条件

1) 隧道两岸陆域段的地貌差异较大:红岛侧为剥蚀堆积地貌,地面起伏大;主城区侧为人工填海造陆,地势平坦。海域段平均水深 6.2 m,最大水深 9.0 m。

2) 海床下方地层以 F5 断裂带为分界:红岛侧基岩裸露;主城区侧上覆 23~30 m 厚的第四系砂土层,其下为岩层。

3) 海底岩层以 F4 断裂带为分界:红岛侧以安山岩和凝灰岩(平均岩石强度约为 40 MPa)为主;主城区侧以泥质粉砂岩和火山角砾岩(平均岩石强度小于 10 MPa)为主。海底岩层中,强风化岩带中等透水,中风化岩带弱透水,微风化岩带微透水。

4) 地下水主要为土层孔隙潜水和岩石裂隙水,其中土层孔隙潜水与胶州湾海水贯通。土层孔隙潜水 Cl^- 的质量浓度为 19 391.15 mg/L, SO_4^{2-} 的质量浓度为 3 458.16 mg/L。水腐蚀性海洋氯化物的环境作用等级为 E 级(非常严重)、化学腐蚀环境作用等级为 D 级(严重)。

5) 隧道共计穿越 9 条断层破碎带,其中, F4 断层和 F5 断层位于海域内,其长度分别为 610 m 和 500 m。

6) 隧址区海域为青岛市的重要水产养殖区。

1.3 工程特点及设计标准

1) 8 号线海底区间隧道是目前我国最长的地铁过海隧道,也是我国穿越海域最长的地铁过海隧道。

2) 隧道拱顶最大埋深位于海平面以下 58 m。

3) 主体结构设计使用年限为 100 年。

4) 结构防水等级为二级。

5) 拟建场地的抗震设防烈度为 7 度,按 8 度考虑抗震设防,并采取相应构造措施。

2 施工方法选择

选择何种施工方法是隧道能否建成及能否实现其功能所需考虑的首要问题,施工方法的选择要结合地质、施工风险、工期及造价等多种因素综合

考虑。8号线海底区间隧道陆域段的长度小于1.5 km,可利用两端车站和岸边通风竖井作为工作面,结合地质条件选择适宜的施工方法。长大过海隧道施工方法的选择难点主要是海域段的施工方法,该工程的隧址区海域为青岛市的重要水产养殖区,且红岛侧海床基岩裸露,不具备沉管法所需的海床基槽开挖条件,因此可排除沉管法。同理,堰筑明挖法也不适用于本工程。由此,根据地质条件初步判断,该工程可选择矿山法或盾构法。

2.1 矿山法

2.1.1 施工风险分析

若海域全隧选择矿山法,为控制工程风险,需要加大隧道埋深,将隧道敷设在良好的岩质地层中。地铁线路的最大坡度为30‰,考虑施工误差及土建结束后调线调坡需要,本工程最大设计坡度取28‰。根据《地铁设计规范》,长大陡坡隧道需考虑运行列车的牵引制动性能和故障下的运行能力,其连续高差不应大于16 m,因此线路应采取“陡坡+缓坡”组合的形式。为控制连续高差,本工程28‰陡坡以每段的平面长度小于500 m进行控制,每段陡坡间通过长度为300 m、坡度为5‰的区段连接过渡。因隧道两端车站均为明挖站,轨面标高受限,该隧道不具备尽可能加大埋深的条件,因此海域全隧采用矿山法施工时,隧道的最大埋深为71.6 m,如图1所示。该施工方法存在2个方面问题:一是在靠近青岛北站侧海域约有1 427 m长的隧道,其拱顶覆中风化岩层厚度不能满足大于等于1.5倍洞径这一基本施工要求;二是最大埋深处隧道承受的水压力过大,受力条件不好。因此,从施工风险角度考虑可排除在海域全隧采用矿山法。

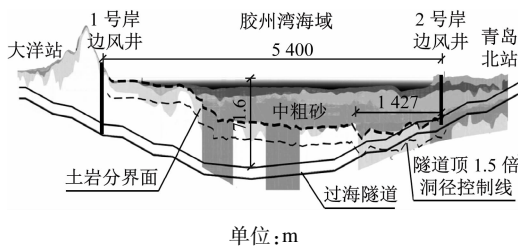


图1 海域段全隧矿山法施工的隧道最大埋深纵断面图

Fig. 1 Diagram of the maximum tunnel burial depth profile for the entire tunnel in undersea section with mining method construction

2.1.2 工程可实施性分析

若海域全隧选择矿山法,应根据不同的围岩级别确定开挖进度的月度控制指标:Ⅲ级围岩、Ⅳ级

围岩、Ⅴ级围岩及Ⅵ级围岩的开挖进度分别为120 m/月、60 m/月、30 m/月及15 m/月。为此,需在海域设置1座深62 m的临时施工竖井,并将海域段划分为4个区段(区段a、b、c和d)同时施工,方能满足该海底区间隧道正线土建的工期目标(36个月)。其海域段全隧矿山法施工组织和工期计划如图2所示。但根据海洋环境评价的相关要求,因隧址区海域为重要水产养殖区,不能进行竖井施工作业。因此从可实施性角度考虑可排除海域全隧矿山法。

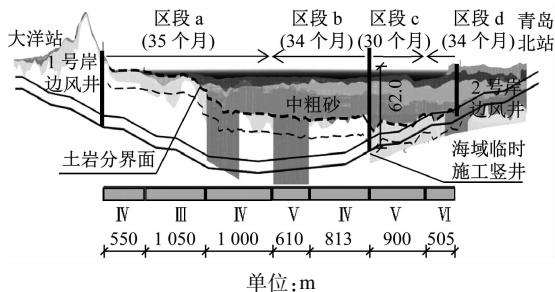


图2 海域段全隧矿山法的施工组织和工期计划图

Fig. 2 Diagram of construction organization and schedule plan for the entire tunnel in undersea section with mining method construction

综上所述,从施工风险和可实施性2个方面分析,矿山法无法满足本工程的要求,因此海域段排除全隧采用矿山法施工的方案。

2.2 盾构法

若海域全隧采用盾构法施工,隧道可选择浅埋方案(最大埋深为28.0 m),其纵断面如图3所示。此时海域段隧道面临以下难题:①大洋站侧海域基岩突起段的盾构施工面临刀盘磨损严重、刀具更换频繁及施工效率低下等硬岩盾构施工的普遍难题;②海域中粗砂层泥水盾构成膜效果差,长距离掘进施工的风险较高;③在海域中粗砂层中停机检查和更换刀具时,施工风险较大;④在海域中粗砂层中进行海底泵站和联络通道等附属设施施工,其施工难度较大。考虑这些施工难点和风险,海域段全隧排除采用盾构法施工。

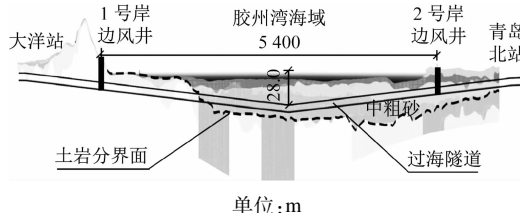


图3 海域段全隧盾构法施工的纵断面示意图

Fig. 3 Profile diagram of the entire tunnel in undersea section with shield tunneling construction

综上所述,根据地质条件和施工要求,该工程海域段可选择“矿山法+盾构法”组合施工方案(以下简称“组合施工方案”),即:在大洋站侧海域硬岩地层选择矿山法,在青岛北站侧海域软岩地层采用盾构法。考虑隧道土建附属结构的施工风险,盾构段采用敷设于浅埋岩层的方案,2 种施工方法的对接点选择在 F5 断层西侧良好岩层内。隧道拱顶最大埋深为海平面以下 58.0 m。组合施工方案下海底区间隧道的纵断面如图 4 所示。

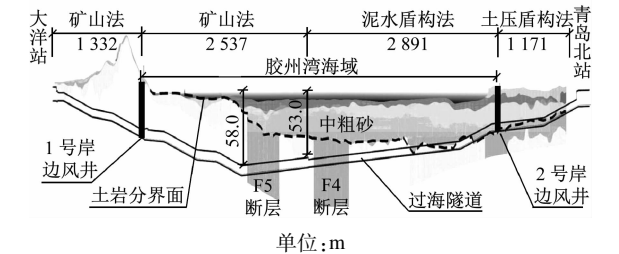


图 4 海域段组合施工方案的纵断面示意图
Fig. 4 Profile diagram of undersea section with combined construction plan

采用组合施工方案后,该工程海底区间隧道的施工组织和工期计划如图 5 所示,满足施工要求和建设进度要求。

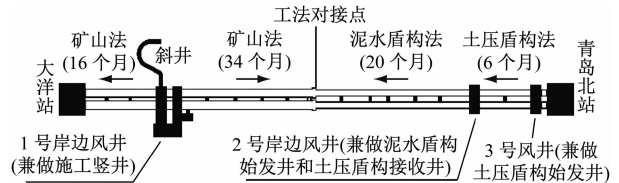


图 5 海域段全隧采用组合施工方案的施工组织和工期计划示意图
Fig. 5 Diagram of construction organization and schedule plan for the entire tunnel in undersea section with combined construction plan

3 海底复杂地质应对措施

3.1 穿越大型海底断层破碎带施工

穿越断层破碎带施工时,易发生坍塌、冒顶、突水及突泥等事故,控制开挖面的稳定性是隧道穿越断层破碎带施工的关键技术。

3.1.1 矿山法穿越海底 F5 断层破碎带

图 6 为该工程采用矿山法穿越海底 F5 断层破碎带示意图。该工程海底 F5 断层破碎带的宽度约为 500 m,属压扭性断层,岩性为凝灰岩。断裂带内岩面自西向东成阶梯状下潜,共有 2 个断点,每个断点处岩面错动高差均为 4~5 m。断裂带内岩石饱

和抗压强度平均值为 35.2 MPa,断裂带接收海水下渗补给。

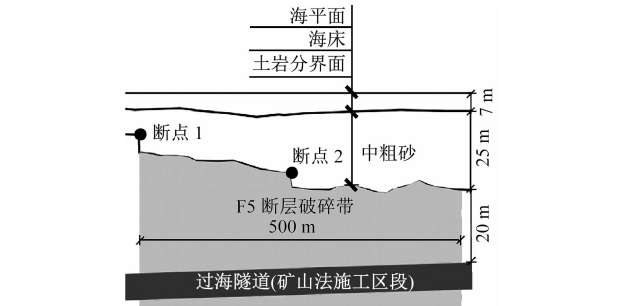


图 6 采用矿山法穿越海底 F5 断层破碎带示意图
Fig. 6 Diagram of undersea section crossing F5 fracture zone using mining method

在采用矿山法穿越海底 F5 断层破碎带施工过程中,应主要做好超前地质预报和制定恰当的施工辅助措施 2 项工作。

1) 超前地质预报。超前地质预报采用以地质分析为主,长距离宏观预报与短距离精确预报相结合、超前探孔与物探相结合、多种物探方法相互补充验证、定性与定量相结合的综合超前预报方式。图 7 为海底区间隧道矿山法施工的超前地质探孔布置示意图,在隧道上半断面设置 3 个长度为 30 m 的超前地质探孔,以直观了解前方围岩和地下水的具体情况,充分利用其得到的有效信息来制定恰当的施工辅助措施。



图 7 海底区间隧道矿山法施工的超前地质探孔布置示意图
Fig. 7 Diagram of advanced geological exploration hole layout for mining method construction of undersea section interval tunnel

2) 施工辅助措施。矿山法海底隧道主要采用注浆加固技术穿越海底破碎带,注浆技术包括超前帷幕注浆、正面注浆、背后回填注浆及必要的径向注浆等。通过注浆形成加固圈,以提高围岩稳定性、降低地层透水性,从而保证开挖面的施工安全。

3.1.2 盾构法穿越海底 F4 断层破碎带

海底 F4 断层破碎带的宽度约为 610 m,属压扭性断层,破碎带内多为压碎岩、强烈片理化和糜棱

岩化等粉碎性物质,并充填了断层泥。海域 F4 断层破碎带内有高压构造裂隙水。

本工程采用泥水盾构穿越海底 F4 断层破碎带。施工时对泥浆循环渣样进行了适应性分析,用以控制泥膜成型质量,确保开挖面稳定。同时优化了机器设备的掘进参数,以避免发生管片拼装质量差、管片上浮等不良现象。

3.2 泥水盾构在海底高水压复杂地层中长距离掘进

2 台泥水盾构自岸边始发后,独头掘进距离为 2 891 m,在到达施工方法对接点前需穿越全断面砂层、砂土与岩石复合地层、软岩与硬岩复合地层、全断面岩层、大型海底断层破碎带等多种复杂地层。海域盾构段最小水下埋深为 28 m,最大水下埋深为 53 m。泥水盾构在海底高水压复杂地层中的长距离掘进施工,主要需解决好以下 2 个方面问题:一是盾构机对不同地层的适应能力,二是海底高水压开仓检修换刀问题。这 2 个问题相辅相成,盾构机对地层适应能力提高可减少开仓次数和减少设备故障率,检修换刀作业顺利进行又能提高盾构机对地层的适应能力。

1) 盾构机对地层的适应能力。可通过优化改进传统设备的方式提高盾构机对海底复杂地层的适应能力,其具体措施为:①对刀盘进行全断面耐磨保护;②优化进浆系统,在前盾和中盾的进浆管路内分别增设 1 个阀门和 1 个折叠型封闭门,以确保管路更换期间掌子面的稳定和人员、设备的安全;③优化排浆系统,增设 1 条备用的排浆管路,并对管路弯头等磨损较大部位进行加厚处理,采用耐磨复合双层管代替传统排浆管,以提高排浆管路的耐磨性。

2) 海底高水压开仓检修换刀。本工程最大水压力近 0.6 MPa,已接近人体承受极限。采用配置人闸减压仓、氩氧饱和和生活仓和穿梭仓的饱和气体带压换刀技术,可确保开仓作业人员安全,提高更换刀具工作效率。

3.3 软弱地层联络通道施工

盾构隧道联络通道为施工的重大风险源。本工程盾构段共设置了 6 座联络通道。为合理规避工程风险,其中埋深较浅的 3 座联络通道(9[#]、10[#]、11[#]联络通道)采用机械顶管法施工,图 8 为采用机械顶管法施工的联络通道地质图。这是我国首次在海底下采用机械顶管法修建联络通道。

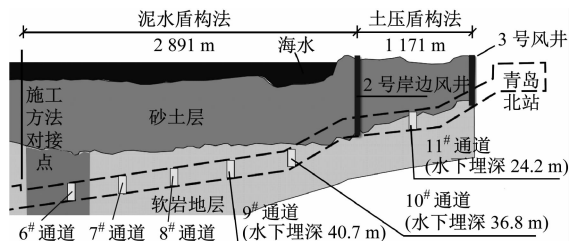


图 8 采用机械顶管法施工的联络通道地质图

Fig. 8 Geological map of the link passage constructed by mechanical pipe jacking method

机械顶管法的总体设计方案为:①主隧道联络通道处管片内设置玻璃纤维筋,并预留可切削部位,使其具备机械顶管法下无需地层加固即可进行始发、接收的条件;②采用套筒法进出洞,以确保施工过程中洞门密封;③直接通过掘进机切削混凝土管片,完成出洞任务;④联络通道与主隧道的接口为空间叠交曲面,采用现浇混凝土结构;⑤每环设管片 2 块,管片的内径为 2.76 m,外径为 3.26 m,厚度为 0.25 m,环宽为 0.90 m;⑥为便于洞门接口施工,联络通道的首末 2 环采用钢筋混凝土管片,其余管片均采用混凝土管片。

4 海域段通风防灾措施

岸边通风竖井将 8 号线海底区间隧道分割为陆域段和海域段两部分。陆域段区间长度较短,采用常规通风方案即可。该工程通风方案的难点在于海域段的设计。

根据 8 号线行车要求,远期高峰时段海域段内有 2 列列车同时运行。为确保灾害情况下行车安全,需保证每个通风区段内仅有 1 列地铁列车,因此需将 5 428 m 的海域段隧道分成 2 个通风区段。

根据通航要求,本工程无法在海域中间设置通风竖井,因此海域段区间隧道采用分段纵向通风排烟方案,其中,在矿山法施工段内的断面设置了专用风道,如图 9 所示。

隧道区间通风工况分正常工况、阻塞工况和火灾工况 3 种。正常工况下,通过列车运行产生的活塞风对隧道进行通风换气。阻塞工况(列车因故障迫停区间)下,海域段区间隧道内的通风气流组织如图 10 所示。火灾工况下,海域段区间隧道的通风气流组织如图 11 所示,此时应及时启动岸边通风竖井内的事故风机,隧道内的送风方向应与乘客疏散方向相反,并尽快排除烟气,以确保乘客的安全疏散及防灾救援的顺利实施。

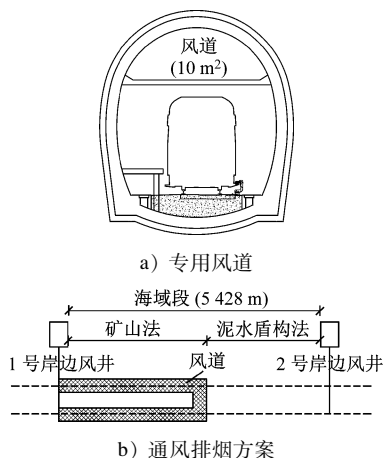


图9 海域段区间隧道分段纵向通风排烟方案示意图

Fig. 9 Diagram of segmented longitudinal ventilation and smoke exhaust scheme for undersea section interval tunnel

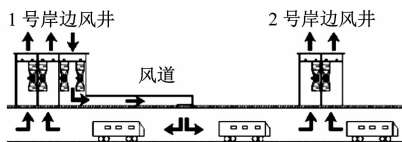


图 10 海域段区间隧道阻塞工况下的通风气流组织示意图

Fig. 10 Diagram of ventilation airflow organization under blockage working condition in undersea section interval tunnel

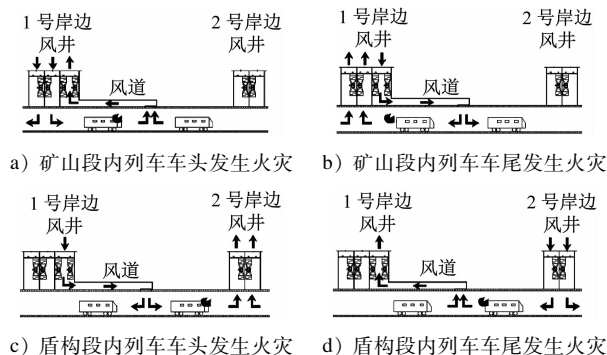


图 11 海域段区间隧道火灾工况下的通风气流组织示意图

Fig. 11 Diagram of ventilation airflow organization under fire conditions in undersea section interval tunnel

5 给排水及消防措施

8 号线海底区间隧道内设有消防给水管和压力排水管。消防给水管以隧道区段的最低点为分界点,在最低点处分别与两端车站形成环状的消防供水管网,由相邻的地下车站提供消防水源。海域段区间隧道消防供水管网布置如图 12 所示。

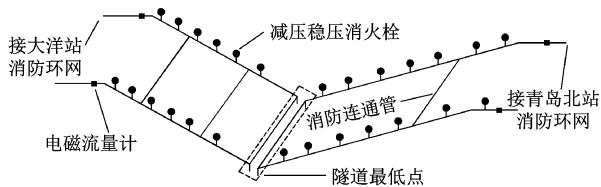


图 12 海域段区间隧道消防供水管网布置示意图

Fig. 12 Diagram of fire water supply network layout for undersea section interval tunnel

该海底区间隧道排水系统布置如图 13 所示,共设 3 处泵站。在区间隧道的最低点设置了海底废水泵站(内设 3 台耐腐蚀潜水泵),用以收集海域段结构渗漏水、隧道日常冲洗废水及消防废水。海底废水泵站用 2 根 DN 250(DN 为公称直径)钢塑复合管分别与两侧的 1 号废水泵站、2 号废水泵站连接。海底废水泵站是海底区间隧道给排水系统重要组成部分,根据国外海底隧道的运作经验,其管路布置和水池容积应以 48 h 不排水条件下能正常收集并储蓄结构渗漏水、隧道日常冲洗及消防废水为原则进行设计。

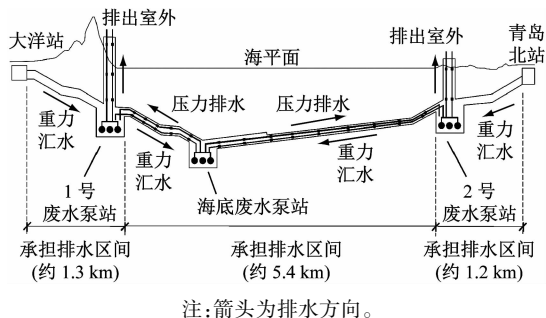


图 13 海域段区间隧道排水系统布置示意图

Fig. 13 Diagram of drainage system layout for undersea section interval tunnel

1 号废水泵站和 2 号废水泵站在收集区间废水的同时,兼做海底泵站的运输泵站,2 个泵站内均设有 3 台耐腐蚀潜水泵。1 号废水泵站和 2 号废水泵站分别用 2 根 DN 250 钢塑复合管敷排至两端车站,将废水排至两端车站附近的室外泄压井中。海底废水泵站内的废水平时排至 2 号废水泵站中,经 2 号废水泵站转排出隧道。当 2 号废水泵站无法排废水时,海底废水泵站内的废水利用阀门启、闭切换排水管路等设施,改由 1 号废水泵站转排出隧道^[7]。

6 结语

青岛地铁8号线海底区间隧道是目前我国最长

的地铁过海隧道,同时也是我国穿越海域最长的地铁过海隧道,其地质条件和海域周边环境非常复杂。本文通过理论分析和综合比选等方法,对该海底区间隧道设计的关键技术进行了分析研究,得出结论如下:

1) 单一的施工方法难以适应长大区间海底隧道复杂多变的地质情况,因此需结合地质条件及各单一施工方法的适用范围,采用组合施工方案予以修建。

2) 海底隧道矿山法施工段应统筹考虑地层透水性和地下水腐蚀性,条件允许时尽量采用半包限量排放防水模式,以控制隧道的结构尺寸。

3) 当长大区间海底隧道无法在海域段内设置通风竖井时,可考虑在隧道内设置专用风道,利用岸边通风竖井排风,此时应采用分段纵向排烟设计方案。

4) 长大区间海底隧道给排水及消防系统的潜水泵和配套管路均应进行耐腐蚀处理,泵站水池容积需按应急工况考虑,即泵站在一定时间(一般为48 h)内无法排水时也可满足安全运营需求。

近年来,我国海底隧道建设发展较快,跨海段隧道长度越来越长。为进一步控制海底隧道的建设风险与工程投资,建议就离岸深水作业竖井平台开展深入研究,以提高水下隧道的地质勘察技术及长距离独头快速与安全掘进技术。

参考文献

- [1] 陈建芹,冯晓燕,魏怀,等. 中国水下隧道数据统计[J]. 隧道建设(中英文),2021,42(3):483
CHEN Jianqin, FENG Xiaoyan, WEI Huai, et al. Data statistics

(上接第158页)

LIU Xiang, ZHAO Yushan, XIE Wenjie, et al. Application of horizontal freezing technique in shield departure and reception portal reinforcement of Wuxi Metro station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 75.

of underwater tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 42(3): 483.

- [2] 杜闯东. 狮子洋隧道盾构地中对接技术及实施[J]. 隧道建设, 2014, 34(8): 771.
DU Chuangdong. Shield docking technologies for Shiziyang Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(8): 771.
- [3] 张健儒. 广深港客运专线狮子洋隧道泥水盾构泥浆综合管理技术[J]. 隧道建设, 2017, 37(增刊2): 189.
ZHANG Jianru. Comprehensive slurry management technology for slurry shield used in Shiziyang Tunnel on Guangzhou-Shenzhen-Hong Kong Passenger-dedicated Line[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2): 189.
- [4] 陈永胜. 上海长江隧道火灾事故应急救援方法研究[J]. 武警学院学报, 2016, 32(10): 30.
CHEN Yongsheng. On the methods of fire accident emergency rescue in Shanghai Yangtze River Tunnel[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2016, 32(10): 30.
- [5] 陈启伟. 台山核电取水隧洞工程泥水处理技术的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(1): 130.
CHEN Qiwei. Application of slurry treatment technology in construction of intake tunnel of Taishan nuclear power station[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(1): 130.
- [6] 杜宝义, 宋超亚, 贺维国, 等. 海底隧道钻爆法与盾构法交接技术及应用[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 208.
DU Baoyi, SONG Chaoye, HE Weiguo, et al. On transfer technology of D & B construction method and shield construction method at the interface of a subsea tunnel and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(2): 208.
- [7] 胡哲睿. 地铁超长海底隧道给排水系统超压模拟及防护[J]. 给水排水, 2016, 52(10): 127.
HU Zherui. Overpressure simulation and protection of water supply and drainage system in super-long submarine tunnel of subway[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(10): 127.

(收稿日期:2022-02-14)

- [5] YANG P, KE J, WANG J G, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(6-7): 330.

(收稿日期:2022-10-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821