

盾构机掘进穿越海底基岩技术应用

李前卫

(上海建通工程建设有限公司, 上海市 200042)

摘要: 针对我国复杂海底地质条件下, 盾构机掘进穿越“海底”基岩技术应用的技术挑战与环境影响问题, 依托浙江省舟山市沈家门海港“嵊泗至定海公路普陀鲁家峙至东港公路工程”实践, 系统分析总结了盾构机在复杂的海底凸起基岩地层中的掘进技术经验与关键施工参数, 如掘进速度、总推力、刀盘扭矩、土仓压力、注浆控制等。研究提炼了基于精准地质预判、刀具优化选型、掘进参数动态调控及注浆技术保障的核心施工技术体系。实践表明, 该技术体系有效保障了施工安全, 显著降低了地层扰动及环境影响, 研究成果为类似复杂基岩条件下的盾构隧道设计、施工参数优化及风险控制提供了直接、有价值的参考依据。

关键词: 盾构施工技术; 复杂基岩地层; 施工参数优化; 环境影响控制

中图分类号: U455.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0320-05

Application of Shield Tunneling Technology for Crossing Seabed Bedrock

LI Qianwei

(Shanghai Jiantong Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai 200042, China)

Abstract: In response to the technical challenges and environmental impacts of the application of shield machine tunneling through “seabed” bedrock under the complex seabed geological conditions in China, and relying on the practice of the “Shengsi to Dinghai Highway Putuo Lujiazhi to Donggang Highway Project” at Shenjiamen Seaport in Zhoushan City of Zhejiang Province, the technical experience and key construction parameters of shield machines in complex seabed uplift bedrock strata are systematically analyzed and summarized, which are tunneling speed, total thrust, cutterhead torque, soil chamber pressure and grouting control. A core construction technology system based on precise geological prediction, optimized tool selection, dynamic regulation of tunneling parameters and technical support for grouting is studied and refined. The practice shows that this technical system effectively guarantees the construction safety and significantly reduces the stratum disturbance and environmental impact. The research results provide the direct and valuable reference basis for the design, construction parameter optimization and risk control of shield tunnels under similar complex bedrock conditions.

Keywords: shield tunneling technology; complex bedrock strata; construction parameter optimization; environmental impact control

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展, 盾构隧道工程的应用场景已从内陆江河、城市地下空间延伸至跨海通道领域^[1-2]。沿海岛屿群的经济协同发展需求(如舟山群岛、粤港澳大湾区等), 亟须通过海底隧道实现岛陆联通。然而, 海底地质条件具有显著的特殊性与复杂性: 多变的码头结构、海堤大坝、地震带、沉积层、基岩等, 使得盾构在下穿时应针对特定地质条件制定相应的解决方案。尤其在近海岛屿

区, 小范围突起的基岩群(如舟山群岛的凝灰岩)与软硬交互地层组合, 极易导致刀具非均匀磨损、掘进参数失稳及地表沉降超标等问题, 严重制约施工安全与工程效益。现有研究虽在陆域复杂地层盾构施工方面积累了丰富的经验, 但对近海海底复杂地质条件下相关盾构掘进施工研究和实践的适应性技术体系尚未完善^[3-5]。具体表现为: (1) 传统地质勘察手段对海底微地貌的识别精度不足; (2) 既有参数控制模型难以应对岩层突变的动态载荷; (3) 缺乏针对基岩-软土复合地层的工艺优化标准。这些瓶颈使得此类工程仍高度依赖个案经验, 亟须建立普适性技术框架^[6]。

本文以浙江省舟山市“嵊泗至定海公路普陀鲁

收稿日期: 2025-07-05

作者简介: 李前卫(1975—), 男, 本科, 工程师, 从事公路工程建设工程监理工作。

家峙至东港公路工程”为研究对象,重点研究盾构机在穿越海底凸起基岩的施工方法和关键控制技术指标参数的变化情况影响。通过对掘进参数的动态调控和工艺适应性优化相结合的方式,实现安全、平稳、高效通过。分析典型特殊地质条件下的盾构施工穿越海底凸起基岩的关键技术参数变化规律,完善海底类似工程盾构施工基础实践应用,推动挑战盾构海底掘进技术创新,为以后研究类似工程夯实基础应用提供价值参考。

1 工程概况

嵊泗至定海公路普陀鲁家峙至东港公路工程位于浙江省舟山市普陀区,工程路线起于鲁家峙岛规划万绿路与新二路交叉口,沿规划万绿路,经沈家门港,穿过刺棚山,终于海洲路与晨晖街交叉口,路线起点桩号 K0+000,终点桩号 K2+225,全长约 2.225 km。

海底盾构隧道区段起点位于舟山市沈家门船舶修造有限公司东侧约 200 m 的鲁家峙海积平原区沿岸,终点位于沈家门海鲜夜排档附近的沈家门海积平原区沿岸。海底盾构穿越基岩段位于 K0+980 ~ K0+998 段,约 18 m,根据设计及地勘报告揭示地层底部为中风化凝灰岩,基岩面起伏较大,岩面由航道中心向两侧倾斜,基岩埋深较浅,揭露基岩埋深约为 27.4 ~ 31.8 m,盾构掘进时基岩凸起浸入盾构掘进范围高约 1.5 m。

2 地质勘察

2.1 掘进前地质补勘及工程物探调查

为保障盾构掘进安全顺利无害通过,建设各方协调统一意见后决定,对该海域全段委托第三方进行一次详细补勘,摸清掘进范围内具体地形特征,以便制定针对性解决方案。第三方补勘及工程物探调查报告所采用调查方法为导航定位与沿线布置、单道地震调查。

2.2 工程地球物理测线布设

调查工程地球物理主测线平行于海底隧道方向布设,2 条隧道中轴线各布设 1 条,中间位置布设 1 条,中轴线两侧以 20 m 间距各布设 2 条,共计 7 条主测线;检测线垂直于隧道方向布设,间距 50 m,共计 9 条。本次调查范围呈矩形,长约 500 m,宽约 100 m,完全覆盖海底隧道区域。测线布设情况如图 1 所示。

2.3 单道地震资料分析

调查由东向西平行于隧道方向共布设 7 条主测

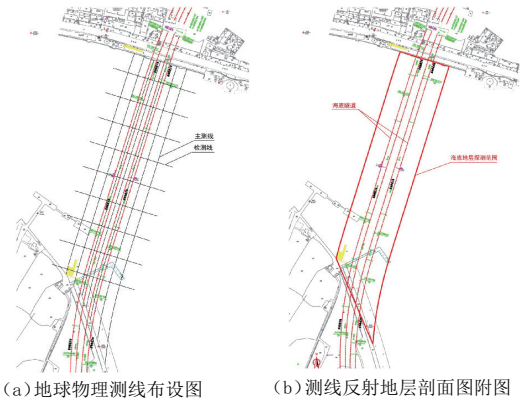


图 1 测线布设及剖面

线,分段描述沿每条测线方向的地层分布特征及基岩埋设状况,均揭示该区段疑似有基岩凸起,隔断地层,基岩最浅埋深约 24.6 ~ 30.6 m 变化。单道地震勘探原理如图 2 所示。

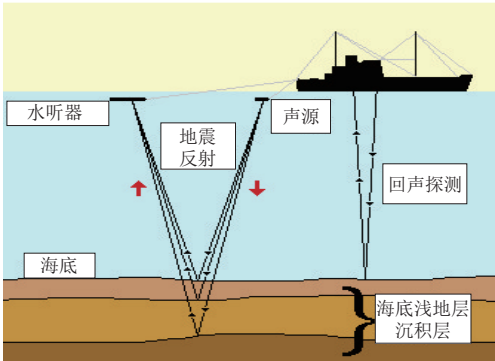


图 2 单道地震勘探原理示意图

2.4 补勘物探结论

调查区域内海底面以下 40 m 以浅上覆土层主要为粉质黏土,局部含砾砂、贝壳碎屑等。下伏基岩较深,仅在 KP0.22~0.32 区段(以海底隧道沈家门登陆点为起点计算)探测到基岩,探测区域内基岩凸起点最浅埋深约 24.6 m,高程约-30.9 m(1985 国家高程基准),位于 6 号测线 KP0.25 附近。沿左线隧洞设计轴线上,基岩凸起点最浅埋深约 25.9 m,高程约-32.1 m(1985 国家高程基准),位于 KP0.26 附近。沿右线隧洞设计轴线上,基岩凸起点最浅埋深约 29.6 m,高程约-35.4 m(1985 国家高程基准),位于 KP0.27 附近。测绘反射地层剖面如图 3 所示。

3 盾构机穿越基岩技术要求

根据地质和补充勘察报告,在海中里程 K0+980 ~ K0+998 段,盾构机需要穿越部分凸起基岩。针对海底这种上软下硬的凸起复杂基岩地质条件,经过对地质岩性和实际海底状况进行分析,主要考虑如何稳定掘进时上部软地层开挖面。因此,在掘进时应

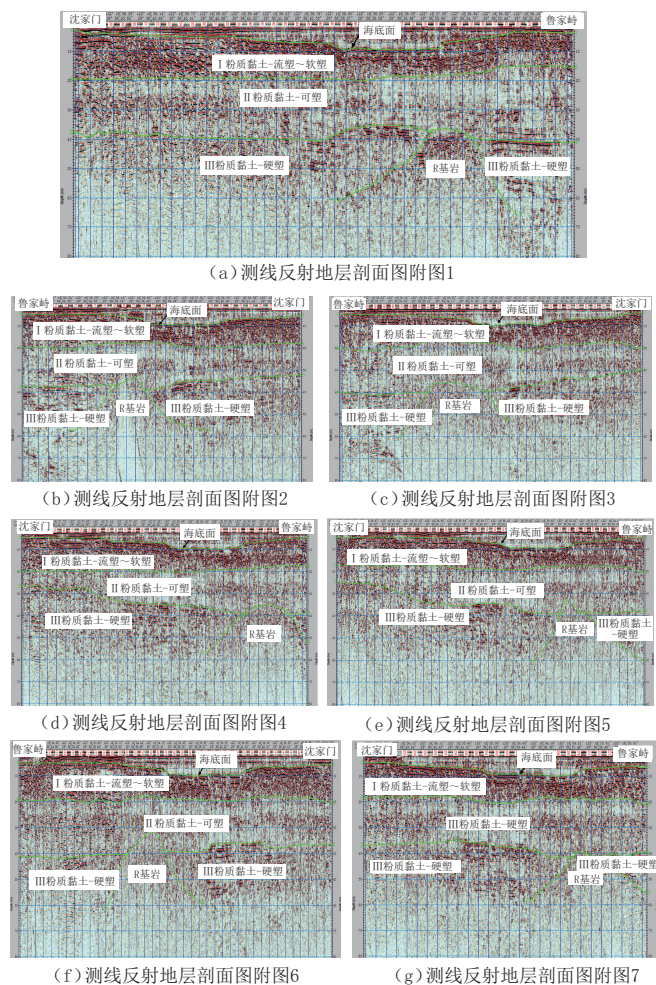


图3 测线反射地层剖面

优化调整合适的掘进参数,避免因盾构机推进速度的变化,造成泥浆循环式切换和供排浆量调整变化等因素对切口处的压力产生波动,引起开挖面压力失稳,从而引发开挖面坍塌。盾构机在掘进过程中,为保障维持上部地层处于稳定状态,主要应从盾构设备、开挖面稳定、掘进参数变化、信息化施工管理等方面加强上软下硬海底地层环境的掘进量及盾构机姿态控制等问题规划及技术要求。

在设备配置方面,应充分认识穿越凸起基岩的风险,在盾构机设备选型时应考虑盾构机的切削能力。

地质交界面下部为泥质砂岩,自稳性强;而上部为粉质黏土,自稳性较差,在受到扰动后易发生坍塌和超挖。因此,在掘进时应按照软地层掘进模式控制,依靠设备自身的泥水加压平衡模式,设定合适的泥水压力,形成具有良好护壁性能的泥膜来稳定开挖面,确保黏土层不发生坍塌和超挖情况。

严格遵循“切口压力稳定、低推力、低刀盘转速、匀速推进、减小扰动、保证注浆”的原则,同时通过调

整导向油缸长度、推进压力等来优化盾构机姿态,避免盾构呈V形姿态向前掘进。

隧道总体在纵向上处于上软硬不均的地层中,应严格控制管片的拼装精度,防止管片过大错台,在基岩左右60 m,根据不均匀沉降情况,动态进行二次注浆稳定开挖面。

在穿越基岩段时盾构实际推进过程中,当班人员分析判断后对注浆量、压浆部位和注浆压力进行调整,对盾构的掘进参数及时进行优化调整。

4 穿越基岩

4.1 穿越前准备

在穿越基岩前重点编制专项方案,方案中对各种可能的风险都要做全面估计,并制定应对策略、措施方法,特别是可能出现的突发风险和正确的应急处置方法,同时应有清除基岩的备选方案,安全措施等准备到位。审批后,在盾构机距离基岩(位于K0+980~K0+998)段2环时调整盾构参数,准备穿越基岩段。

4.2 盾构穿越基岩参数分析

隧道的内径为10 300 mm,外径11 300 mm,标准环宽2 000 mm的特征,依据规范及相关盾构机掘进技术参数控制要点,结合海底盾构掘进关键控制参数,选取代表性指标掘进速度、掘进总推力、刀盘扭矩三个关键性指标参数进行研究,分析其在海底凸起硬质基岩掘进的变化规律以及参数变化,盾构机产生的影响等变化进行展开分析。盾构机掘进每环为2 000 mm计算,分析盾构油缸行程,按600、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800、2 000、2 400 mm循环,选取盾构机穿越凸起基岩段982.53~984.53 m、984.53~986.53 m、986.53~988.53 m三段掘进参数进行质量统计分析:

通过对表1中29个每分钟掘进速度参数进行统计分析和表4可以看出,盾构在进入凸起硬岩以平均值14.9 mm/min的掘进速度,参数明显降低于正常20~25 mm/min,且出现明显波动,说明刀盘进尺遇到基岩硬度变化较大,盾构控制难度增大。

通过对表2中29个总推力参数和表4进行统计分析,指标平均值4 624 t与正常推力软土(5 000~1 000 kN)比较,总体变化比较稳定,变异系数4.84%,小于8%推荐值,说明在部分凸起硬质基岩中推力影响不明显。

通过对表3中29个刀盘扭矩参数和表4进行统

表 1 穿越凸起基岩区掘进速度参数 单位:mm/min

序号	油缸行程/m	基岩段		
		982.53 ~ 984.53 m	984.53 ~ 986.53 m	986.53 ~ 988.53 m
1	600	18	15	18
2	800	21	12	15
3	1 000	15	18	12
4	1 200	15	18	15
5	1 400	24	18	12
6	1 600	9	15	9
7	1 800	18	12	9
8	2 000	18	12	12
9	2 200	12	12	12
10	2 400	18	18	

表 2 穿越凸起基岩区掘进总推力参数 单位:t

序号	油缸行程/m	基岩段		
		982.53 ~ 984.53 m	984.53 ~ 986.53 m	986.53 ~ 988.53 m
1	600	4 327	4 800	4 507
2	800	4 261	4 587	4 479
3	1 000	4 370	4 676	4 657
4	1 200	4 536	4 674	4 756
5	1 400	4 698	4 741	4 617
6	1 600	4 702	4 739	4 080
7	1 800	4 311	4 932	4 733
8	2 000	4 793	4 878	4 832
9	2 200	4 581	4 865	4 853
10	2 400	4 557	4 748	

计分析,凸起软硬基岩掘进参数平均值 3 580 kN·m,表明刀盘扭矩影响较小,但极差值 1 939 说明盾构机在掘进过程中扭矩力变化波动较大,盾构机掘进抖动明显,姿态控制需要动态调整,以适应特殊段掘进参数控制在合理范围内。

表 3 穿越凸起基岩区掘进刀盘扭矩参数 单位:kN·m

序号	油缸行程/m	基岩段		
		982.53 ~ 984.53 m	984.53 ~ 986.53 m	986.53 ~ 988.53 m
1	600	2 912	3 462	3 667
2	800	3 262	3 505	4 214
3	1 000	3 014	3 549	3 999
4	1 200	3 222	3 902	4 152
5	1 400	3 688	3 404	4 404
6	1 600	3 288	3 095	2 630
7	1 800	2 995	3 944	3 688
8	2 000	3 081	3 404	4 851
9	2 200	3 476	3 622	3 616
10	2 400	3 555	3 118	

表 4 是基于表 1、表 2、表 3 中的参数,在分析掘进速度、刀盘扭矩及推力数据的离散程度时,采用了以下统计学公式。

表 4 综合分析表 1~表 3 参数中离散性指标

掘进速度/(mm·min ⁻¹)	总推力/t	刀盘扭矩/(kN·m)
15	858	1 939
14.90	4 624	3 580
3.72	223.9	447.2
24.95	4.84	12.49

$$R = \text{Max} - \text{Min} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N}} \tag{3}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \tag{4}$$

分析所用式(1)中,R代表极值,在此描述数据离中趋势的指标,Max和Min分别表示掘进速度的最大值与最小值;式(2)为该组数据的算术平均值 μ ,描述数据集中趋势的指标;式(3)为总体标准差 σ ,用来衡量数据离散趋势的核心指标,在这里表示每个观测值相对于平均值的平均偏离程度;式(4)变异系数 C_v 无量纲的相对离散度量指标,把标准差 σ 标准化为平均值 μ 的百分比,通过消除数据自身量纲和平均水平的影响,便于比较不同量纲参数(如掘进速度、刀盘扭矩、推力)之间或不同工程背景下数据的离散程度。

5 结 语

综合分析盾构机在穿越海底时面对凸起的坚硬基岩,给盾构掘进造成上软下硬的特殊施工掘进环境条件,确实会给盾构机掘进带来困难和风险。通过工程实践,掘进记录中掘进速度、总推力、刀盘扭矩及其参数分析,可得出如下结论:

(1)掘进速度会有明显降低,平均约 33.7%,且变化较大,平均掘进速度值为 15 mm/min,应引起足够的重视,提前做好应对措施。

(2)总推力影响不明显,平均总推力值 4 624 t,基本接近推荐值 5 000 t,总体变化比较稳定,变异系数 4.84%,小于 8% 推荐值,说明盾构穿越基岩时总推力不能太大的理论。

(3)刀盘扭矩平均值 3 580 kN·m,在凸起基岩软硬环境中掘进波动在允许范围内,但极差值为 1 939 kN·m。盾构机在掘进过程中扭矩力变化波动

较大,盾构机掘进抖动明显,说明盾构机掘进刀盘进尺上软下硬地质环境中的复杂变化程度,姿态控制需要动态调整。验证了盾构机在凸起基岩应遵循“切口压力稳定、低推力、低刀盘转速、匀速推进、减小扰动、保证注浆”的掘进原则。

据分析结论判断盾构机在遇到凸起基岩的特殊海底地质环境时,因下部刀盘切削基岩作用力随不断推进而变化增加,上部软土层切削作用力较小,刀盘偏向受力,所以盾构机抖动明显。刀盘扭矩变化指标说明盾构机处于该特殊地质环境掘进中。总推力略有减小并基本维持不变,说明盾构机依靠自身平衡系统的调节正在发挥作用。掘进速度的明显降低验证了盾构机在此环境下不能保持正常速度,否则会引起其他指标的不稳定和盾构机发生偏离姿态的风险,严重情况下可能造成该段隧道管片安装困难,隧道偏离的质量和安全事故。因而正确选取特殊地质环境下的海底凸起基岩盾构掘进参数进行设置,是科学也是实践经验的积累,

本文旨在通过分析盾构机在海底复杂地质环境下面对凸起基岩掘进参数的变化规律,为海底盾构在复杂地质环境下掘进积累宝贵的参数指导、不断完善盾构在海底施工技术创新和挑战略尽绵薄之力。

参考文献:

- [1] 陈迪杨,李利平,王旌,等.基于冲击回波法的盾构隧道壁后注浆质量检测研究[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(1):213-221.
- [2] 宏润建设集团股份有限公司.盾构机倒拔装置:CN202421757161.0[P].2025-06-03.
- [3] 中铁四局集团有限公司,中铁(上海)投资集团有限公司.一种TBM模式下岩溶强发育盾构隧道组合式注浆方法:CN202411380131.7[P].2024-12-31.
- [4] 盾构及掘进技术国家重点实验室,中铁隧道局集团有限公司.可旋转冲击的掘进机破岩部件及方法:CN202411383193.3[P].2024-12-31.
- [5] 《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术研究综述·2015[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.
- [6] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,50(1):97-109.
- [10] 刘平.超大直径盾构穿越地铁站施工变形控制[J].散装水泥,2024(1):111-113.
- [11] 刘帅.大直径盾构近距离穿越机场通道桥施工技术[J].上海建设科技,2023(5):27-30.
- [12] 张海超.大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):934-940.
- [13] HUANG M, WANG K, LU J, et al. Nonlinear analysis of the mechanical response of an existing tunnel induced by shield tunneling during the entire under-crossing process[J]. Sustainability, 2024, 16(18): 8224-8237.
- [14] HUANG K, SUN Y wei, YANG J sheng, et al. Three-dimensional displacement characteristics of adjacent pile induced by shield tunneling under influence of multiple factors[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5): 1597-1615.
- [15] 高坤,苏校锋,张志伟,等.新建隧道上穿引起既有盾构隧道纵向隆起分析[J].隧道建设(中英文),2023,43(5):770-778.
- [16] Teo P L, Wong K S. Application of the hardening soil model in deep excavation analysis[J/OL]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2012: 1-10 (2012-07-18) [2025-01-20]. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19373260.2012.696445>.

(上接第301页)