

过江泥水盾构成功穿越正交断裂带经验总结与对工程勘察设计的启示

瞿建勋

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘要: 针对正交断裂带地质条件复杂、易引发盾构滞排及江中冒浆等险情。以某城市轨道交通区间过江泥水盾构穿越2条正交断裂带交汇处的施工为例,通过采取加密施工勘察勘探点间距(间距1.5 m)以获取工程地质信息、优化泥浆性能(比重提升至1.26)以提升泥浆携块石能力、实施破碎地层预注浆加固、开仓清理滞排石块等综合技术措施,使得盾构成功穿越了断裂带,系统性地控制了施工风险,并验证了采取加密施工勘察和综合技术措施的有效性。建议针对盾构法隧道特殊性,应优化勘察规范,减小极复杂场地勘探点间距;重新评估在断裂带地层RQD值对盾构法隧道围岩质量的适用性;提高设计阶段风险等级,增加江中注浆预加固等辅助措施,必要时调整隧道线路以避让断裂带,降低施工风险。

关键词: 断裂带;盾构法;泥水滞排;隧道围岩;勘察

中图分类号: U455.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0257-04

Experience Summary of Cross-river Slurry Shields in Successfully Crossing Orthogonal Fault Zones and Its Implications for Engineering Survey and Design

QU Jianxun

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the complex geological conditions of the orthogonal fault zone, which is prone to cause dangerous situations such as shield stagnation and slurry gushing in the river, taking the cross-river construction of a slurry shield machine crossing the intersection of two orthogonal fault zones in an urban rail transit section as an example, the comprehensive technical measures of increasing the spacing of construction survey and exploration points (1.5 m spacing) to obtain engineering geological information, optimizing the slurry performance (proportion increased to 1.26) to enhance the slurry ability to carry boulders, executing pre-grouting reinforcement of fractured strata, opening chamber to clear the stagnant stones are taken to make the shield successfully cross the fault zones, and systematically control the construction risks. And the effectiveness of increasing the construction survey and the integrated technical measures is verified. It is recommended to optimize the survey specifications and reduce the spacing of exploration points in extremely complex sites for the particularities of shield tunneling. The applicability of the RQD value in the fault zone strata to the surrounding rock quality of shield tunneling is re-evaluated. The risk levels in design phase are elevated. The auxiliary measures of pre-reinforcement by grouting in the river are added. When necessary, the tunnel route is adjusted to avoid the fault zone and reduce the construction risk.

Keywords: fault zone; shield tunneling method; slurry stagnation; tunnel surrounding rock; survey

0 引言

城市轨道交通线网布局受到众多因素制约。在实际建设过程中,部分地铁区间建设遭遇复杂地质

难题不可避免,盾构区间穿越地质断裂带便是典型案例。地质断裂带的破碎岩层具有节理裂隙发育、极易变形、透水性大、围岩自稳性能低等特性,这些特性对此类隧道的建设提出了严峻的挑战。

关于盾构穿越地质断裂带破碎岩层的研究,学术界已取得许多成果。刘智等^[1]通过盾构机刀盘、泥水环流等结构优化来应对泥水盾构穿越断裂带;姜克寒等^[2]通过理论计算不同工况下盾构断裂带地

收稿日期: 2025-01-23

基金项目: 上海隧道工程有限公司基金资助项目(2024-SK-09)

作者简介: 瞿建勋(1986—),男,学士,高级工程师,从事地下工程施工技术研究工作。

层掘进对地表竖向沉降的影响,得出了合理掘进参数;陈海勇等^[3]通过加装采石箱、改进筛分管路来解决破碎带块石堵塞问题;张迎旭等^[4]分析了盾构穿越断裂带风险,通过优化推进参数、调整泥浆性能来避免泥水滞排风险;刘泓志等^[5]通过刀具改制、泥水环流系统设计、提供盾尾密封性能等措施,保证了盾构穿越断裂带的安全。很多学者对盾构穿越断裂带的设备改制、技术举措进行研究,但对于盾构穿越正交断裂带勘察设计的研究相对较少。

某城市地铁区间穿越江底2条正交断裂带,地质情况异常复杂,穿越施工遇到诸多困难。本文通过研究该区间的具体实施过程,总结了过江盾构穿越正交断裂带的工程经验,并给予勘察和设计建议,以期今后类似工程提供指导。

1 工程概况

该工程选用2台横穿闽江、开挖直径6 530 mm、自东向西掘进复合式泥水平衡盾构机施工。盾构恰巧在闽江底穿越北东东向压扭性与北北西向张扭性2条断裂带的“十字”交汇处。

区间穿越闽江段土层分布较复杂,包括黏性土、砂土、残积土、全/强风化岩、中风化硬质岩、破碎带、岩脉侵入等。

该项目受断裂构造影响,裂隙发育富水性较好,与闽江有水力联系。场地基岩存在多期岩脉侵入,下伏基岩在断裂构造作用下节理裂隙发育。特别在北北西向张扭性断裂影响作用下,节理裂隙多呈张开状。断裂带错动易产生陡坎、破碎带,沿断裂侵入的正长斑岩、辉绿岩岩脉分布区域常产生基岩凸起,造成该项目隧道围岩软硬程度严重不均,硬岩平均强度达178.4 MPa。

2 过江泥水盾构穿越正交断裂带经验

我国地铁工程土建项目无论选择何种工法,施工前提供的是同一份地质报告。这在一定程度上就无法满足盾构法施工对勘察工程的一些特殊要求^[6]。现行勘察规范对地下区间复杂场地勘探点间距要求10~30 m。但以该工程经验,盾构穿越江底正交断裂带遇到的地质情况复杂多变,仍以此间距钻探提供的信息无法给予盾构实际推进指导作用。所以在特别复杂区域施工勘察的勘探点间距应适当加密。

围岩异常破碎,处于不稳定状态,易出现开挖面

失稳坍塌,大石块进入仓内而导致泥水系统滞排严重。处理滞排会造成推进缓慢,进一步加剧正面破碎岩层扩大塌落,形成恶性循环,严重时会引起开挖面与江水联通,造成江面冒泡、冒浆险情。该项目为处理滞排采用了提高泥浆指标、加固破碎地层、仓内建压后以人工搬石等措施,效果较好。

2.1 施工勘察勘探点间距加密

根据勘察报告揭示,该区间左右线各有3段基岩凸起段,前后为上软下硬复合地层,如图1所示。

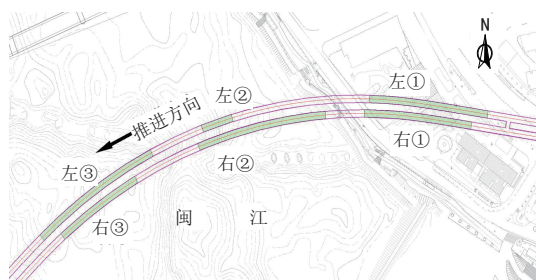


图1 区间基岩凸起段平面图

在实际施工时,盾构推进至过江段时异常艰难,辅以江中注浆加固才能恢复推进。钻孔范围为破碎地层带和盾构进出基岩凸起边坡段,间距约1.5 m,钻孔深度至隧道断面的岩面顶部。借此可以绘制江底进出全断面硬岩边坡的基岩分布情况。此处选取左线656~774环前期勘察结果与加密施工勘察成果进行对比,主要差异见图2至图4和表1。

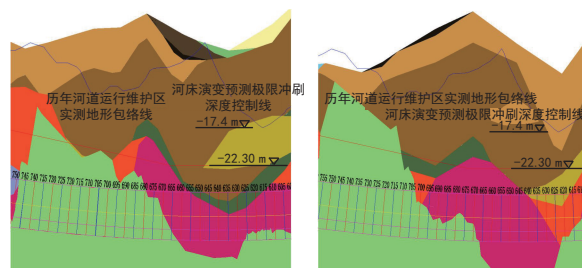


图2 左线第3段基岩凸起段地质纵剖面分段差异对比图

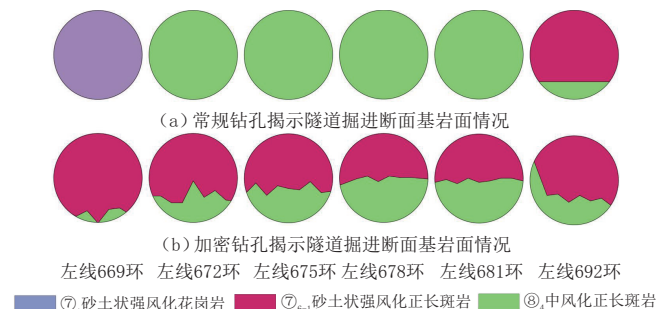


图3 左线第3段基岩凸起段地质横剖面分段差异对比图

由上述对比可见,每隔10 m与每隔1.5 m打设勘探孔获得的数据精度有着显著区别。隧道围岩遇到侵入岩脉时岩面突变,在边坡处研判盾构切口处于

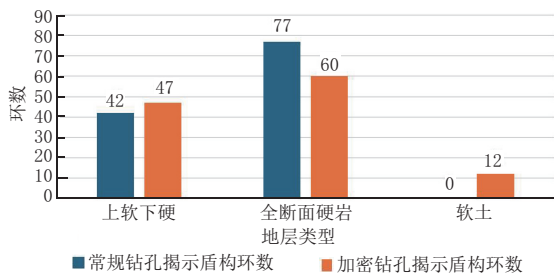


图4 不同密度钻孔揭示盾构环数

表1 不同密度勘探点成果差异分析

推进范围/环	勘探点间距/m	上软下硬岩石段			全断面硬岩段		
		段数	长度/m	总体积/m ³	段数	长度/m	总体积/m ³
382~487	10~30	1	8.4	141	1	99.6	3 336
	1.5	2	10.8	181	1	104.4	3 496
577~623	10~30	1	4.8	80	1	33.6	1 125
	1.5	1	31.2	313	0	0	0
656~774	10~30	3	50.4	741	2	92.4	3 094
	1.5	2	56.4	936	1	72	2 411

上软下硬地层还是全断面硬岩地层对推进参数选择、预设换刀点都会产生重大影响,需要高精度的前期勘察数据支撑。采用加密的施工勘察可以为盾构推进参数调整提供有效依据。

2.2 提高泥浆携块石能力

在软土和软岩地层,地层含有益造浆颗粒,加入少量优质膨润土新浆即可达到指标要求。但本区间地质复杂岩石地层几乎无造浆能力且富含地下水,导致循环泥浆比重仅 1.05,黏度仅 16 s,推进期间频繁出现石块堵管、积仓形成的泥水系统滞排现象。经实践,使用优质钠基膨润土和 HS-1、HS-3 这 2 种高分子材料拌制新浆,额外加入适宜细度的重钙粉,预拌新浆比重可达 1.26,加入泥水环流后可提升环流泥浆比重至 1.20 以上,黏度可维持 20 s。泥浆性能增强前后处置滞排开仓仓数见表 2。

表2 泥浆性能增强前后处置滞排开仓仓数表

项目	环数	滞排开仓仓数/次
泥浆性能增强前	右线 521~530 环	251
泥浆性能增强后	右线 541~550 环	151

对照可知,提高泥浆指标,提升其携块石的能力,可明显减少滞排开仓仓数。

2.3 破碎地层预注浆

对破碎地层进行预注浆加固可以预防和减缓盾构掌子面岩块崩塌情况,同时也为开仓作业提供一个相对安全稳定的环境,是保障盾构在断裂带破碎地层连续掘进的一种有效措施^[7]。该项目在江中专用应急船上设置钻机作业平台,应用袖阀管后退式

注浆工艺。压水泥-水玻璃双液浆,梅花形布孔,间距 1.5 m×1.5 m。岩面至隧道顶部往上 7 m 为加固范围,作业时增加 0.5 MPa 注浆压力即可停止,继续抬升 1 m 注浆。原破碎地层岩心采取率为 75%,预注浆加固后可达 90%,有效固结了破碎地层松散岩体。

2.4 常压、带压开仓及滞排处置

盾构频频遭遇石块塌落堆积仓底,严重滞排,原因是其通过江中 3 段基岩凸起段期间,岩石节理发育、围岩异常破碎,滚刀无法发挥功能。为解决滞排问题,在上软下硬或渗水量较大破碎地层,采用建泥膜带压进仓或进气泡仓清理石块;在全断面岩层,选择人工常压入仓清理滞排石块来疏通环流,恢复推进。

正式掘进前,通过加密勘探孔进一步探明江底正交断裂带基岩面分布状况;应用预注浆加固正交断裂带松散岩体,提高该处岩体稳定性;辅以增强循环泥浆性能,提供泥水环流携块石能力,降低滞排开仓频次;以人工常压、带压进仓清理滞排石块。以上措施协同产生效应,保障了泥水盾构在江中正交断裂带的顺利掘进。

3 对勘察设计的启示

3.1 目前勘察对盾构法隧道围岩稳定性分析针对性不足

现行勘察规范对围岩进行分级的目的是通过分析隧道开挖、围岩加固及初期支护等可能出现的岩土工程问题,针对性地提出防治措施建议,提供隧道围岩加固、初期支护、衬砌设计和施工所需的岩土参数^[8],显然是为矿山法隧道设计施工提供依据。盾构法隧道因其工法本身能力,已足够适应隧道围岩稳定性一般的地质。但对于类似该项目穿越 2 条正交断裂带的复杂地层,就需要对盾构法隧道围岩稳定性作出针对性评价,为地层预处理、盾构机选型、推进方向、推进参数设定等重要决策给予有效建议。

3.2 应减小特别复杂场地勘探点间距

根据该项目经验,常规地质勘察勘探点间距并不满足特别复杂场地需求。过江盾构穿越断裂带这种情况应在工法勘察阶段就减小勘探点间距。在盾构进出基岩凸起段边坡进行密集钻孔,对探明岩面分布情况是非常有效的。必要时可增加水平探孔等手段,进一步揭示特殊部位岩层风化深槽及垂向节理裂隙造成的岩面高程、物理性质的差异,建立断裂破碎带三维地质模型,为盾构穿越此类特别复杂场

地提供依据。

3.3 RQD值不能代表断裂带地层盾构法隧道围岩质量

RQD值为岩石质量分级的一个重要指标。其定义是用直径为75 mm的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中钻进后连续取芯,回次钻进所取岩芯中,长度大于10 cm的岩芯段长度之和与该回次进尺的比值^[9]。由于岩芯管钻进方向垂直于盾构推进方向,所以在盾构法隧道中RQD值无法准确评价推进方向围岩的质量。在断裂带交汇处,隧道围岩裂隙发育各向异性更为明显,RQD值与实际围岩质量的差别更大。该工程施工勘察报告给出:中风化辉绿岩RQD=40~60,中风化花岗斑岩RQD=40~50,属较破碎—较完整。而实际推进情况表明,岩体是非常破碎的,与勘察报告揭示的情况不一致。另外,长度为10 cm的岩石一般能顺畅进入刀盘开口,在特别破碎岩层,大量该尺寸石块进入也可造成滞排现象。所以在盾构法隧道围岩质量评价中,岩块尺寸10 cm是否作为区分岩体完整性的界限值也值得探讨。

3.4 提高风险专项设计等级,增加施工辅助措施

在我国现行设计规范中,盾构隧道在始发、到达、浅覆土、联络通道、换刀与检修或邻近建(构)筑物等区段,宜根据具体情况采取相应的地层加固或施工辅助措施^[10]。设计规范没有对特别复杂地层设置施工辅助措施。该工程因前期勘察获取的信息对盾构法隧道针对性不强,设计对穿越闽江的风险等级确定为Ⅱ级。实际施工过程中,过江盾构穿越江底正交断裂带时发生了多次江中冒泡险情,因此应提高风险等级为Ⅰ级并拟定施工风险应对措施。设计应把江中破碎地层注浆加固作为预处理措施。在特别复杂地质加密勘探点获取信息后,在初步设计阶段可微调区间隧道线路,以避让正交断裂带、降低

施工工程风险。

4 结 语

(1)加密施工勘察勘探点、提高泥浆指标、江中破碎地层预加固、人工带压进仓清理滞排石块等技术措施,可以保障盾构穿越破碎带安全。

(2)现行勘察规范宜针对江底断裂带进行完善和改进,合理评估断层破碎带岩层对盾构法隧道的影响,增强勘察报告对盾构法隧道的参考价值。

(3)初步设计阶段需针对断裂带提高风险专项设计等级,增加初步设计投入。合理利用加密钻孔取样、水平钻孔等手段来确定断裂带岩层的分布规律,综合论证断层破碎带对盾构法隧道施工的影响,合理调整区间隧道线路。

参考文献:

- [1] 刘智,钟长平.超大直径泥水平衡盾构断层破碎带掘进关键技术[J].现代隧道技术,2023,60(1):225-232.
- [2] 姜克寒,刘邦,秦坤元,等.断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J].交通科学与工程,2020,36(3):43-49.
- [3] 陈海勇,郑晓悦,施成华,等.复杂地层大直径越江盾构隧道施工重难点及关键技术——以武汉地铁12号线国-凌段越江隧道工程为例[J].现代隧道技术,2024,61(4):244-254.
- [4] 张迎旭,许斌斌.大直径泥水平衡盾构水下穿越破碎带地层关键施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(15):42-46.
- [5] 刘泓志,曹英贵,代镇洋,等.穿越多种典型地层的跨海超大直径泥水盾构选型及针对性设计——以青岛胶州湾第二海底隧道为例[J].隧道建设(中英文),2024,44(4):793-800.
- [6] 鞠世健,竺维彬.复合地层盾构隧道工程地质勘察方法的研究[J].隧道建设,2007,27(6):10-14.
- [7] 杨战勇.复杂地层跨海隧道孤石及基岩凸起段处置措施[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(11):80-84.
- [8] GB 50307—2012,城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].
- [9] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范(2009年版)[S].
- [10] GB/T 51438—2021,盾构隧道工程设计标准[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

