

盾构穿越江底断裂带技术措施与成本分析

王 强

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘 要: 泥水盾构穿越江底断裂带具有众多不可预见的施工风险, 围岩极易产生崩塌、失稳等现象, 进而会导致施工效率严重降低甚至引起掌子面持续坍塌, 发生江面冒顶等重大事故。结合某城市轨道交通项目盾构区间穿越江底断裂带的实际工效, 分析了所采取的设置应急处置系统、江中砂层加固、上软下硬边坡加固、应急填仓和江面注浆加固、滞排处置(包含设备改制、提升泥浆指标、开仓等)措施的合理性; 另外, 从合同概算外发生和原合同概算内未充分考虑这两方面进行成本分析, 提出了索赔的针对性建议。

关键词: 泥水盾构; 穿越江底断裂带; 实际工效; 成本分析

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0248-04

Technical Measures and Cost Analysis for Shield Machines Crossing Riverbed Fault Zone

WANG Qiang

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

Abstract: The slurry shield tunneling through riverbed fracture zones will have the numerous unpredictable construction risks. The surrounding rock is highly prone to collapse, instability and other phenomena, which can severely reduce the construction efficiency or even lead to the continuous face collapse and major accidents such as river surface blowout. Combined with the actual construction efficiency of shield machine crossing a riverbed fracture zone in an urban rail transit project, the rationality of the taken measures of establishing an emergency disposal system, reinforcing the sand layer in river, reinforcing the upper-soft lower-hard slopes, emergency filling and grouting the river surface reinforcement, and disposal of delayed excretion (including equipment modification, upgrading slurry parameters, and opening chamber) is analyzed. In addition, the cost analysis is conducted from two aspects of occurrence outside the contract budget estimate and insufficient consideration within the original contract budget estimate, and the targeted suggestions for claims are put forward.

Keywords: slurry shield; through riverbed fault zone; actual work efficiency; cost analysis

0 引 言

江底基岩突起断裂破碎带具有风化无规律交替、断裂错动易产生陡坎、围岩软硬严重不均的特点, 因此围岩极易产生崩塌、失稳等现象^[1]。泥水盾构机穿越该地层时会造成盾构机泥水环流严重滞排^[2]进而导致实际工效低下, 甚至会引起掌子面持续坍塌, 发生江面冒顶等重大事故, 从而使工程成本成倍增加。本文结合某地盾构区间穿越江底正交断裂带的成功案例, 总结实施过程中所采取的有效技

术措施; 同时进行成本分析, 并针对超出原合同和概算外的费用进行索赔。分析内容对今后类似工程具有一定借鉴意义。

1 工程概况及工效总结

该盾构区间左线长 1 192 m, 右线长 1 185 m, 采用直径 6 480 mm 的复合泥水气垫式平衡盾构机掘进。双线下穿闽江江底断裂破碎地层长度达 614 m, 隧道埋深 14.2~35.0 m。该处地层主要有中风化正长斑岩、辉绿岩、花岗岩等, 岩石最高强度达 160 MPa (见图 1), 存在极其不规律的风化、断裂凹槽, 且围岩富水性强, 地下水与江水之间存在水力联系, 水文地质条件复杂。由于受极其复杂的地质条件影响, 泥水盾构穿越江底断裂带期间^[3], 左线盾构平均掘进速度仅 0.85 m/d, 历时 11 个月才穿过江底; 右线盾

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: 王强(1989—), 男, 学士, 工程师, 从事隧道施工及管理工作。

构平均掘进速度仅 0.15 m/d,耗时 24 个月才穿越江底。

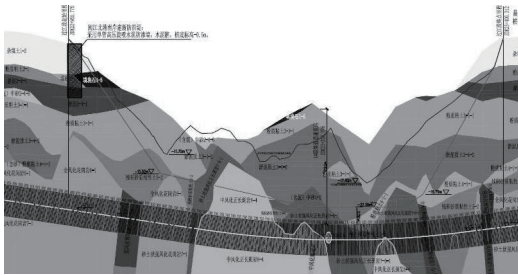


图 1 区间地质剖面图

2 穿越江底断裂带技术措施

2.1 增设江中应急处置系统

为确保盾构过江期间施工安全,有效降低施工风险,在过江施工期间,租赁并改造平板驳船作为江中应急体系,在作业面附近 24 h 巡查待命,以便处置各类应急突发事件。

2.2 江中砂层加固措施

区间隧道在碎裂带上部存在局部砂层,盾构穿越碎裂带时存在涌水、涌砂的风险。因此采用江上预加固方式^[4],通过江中施工船进行加固(加固工艺流程图见图 2)。加固位置为隧道上半洞身两侧 2 m 及拱顶以上 3 m,钻杆应距离隧道外轮廓不小于 1 m。注浆选用袖阀管注浆工艺^[5],浆液采用水泥-水玻璃双液浆^[6],注浆原则以注浆量控制为主、注浆压力控制为辅。

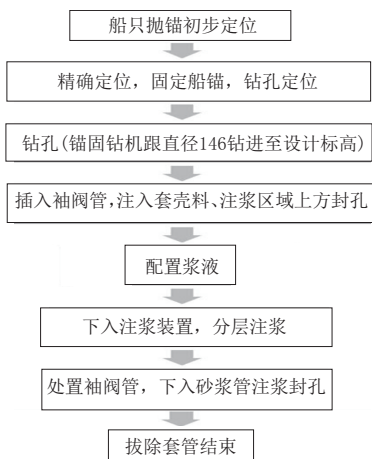


图 2 江中注浆加固工艺流程图

2.3 上软下硬边坡加固措施

上软下硬段^[7]岩石异常破碎,盾构在穿越期间极易发生碎块塌落、拱顶失稳塌仓风险,严重时容易导致江水与盾构切口连通,威胁隧道安全,须对上软下硬不良破碎地层采取预先注浆加固措施。与江中

砂层加固方式一致,对该地层的加固也是从江面进行,加固长度则为上软下硬起止位置各延伸 1.5 m,宽度为隧道洞身两侧各向外延伸 2 m,高度从中风化岩层往上至隧顶 9 m;浆液采用水泥-水玻璃双液浆,注浆的基本原则是以注浆压力控制为主、注浆量控制为辅。

2.4 应急填仓及江面注浆加固

由于推进过程中滞排严重,造成掌子面的泥水支撑压力频繁波动,加之岩石异常破碎和突变性,当开挖面破碎岩块大量持续坍塌,甚至引起江面冒泡时,应采用应急填仓及江面注浆加固措施。泥水仓采用同步砂浆进行填仓以稳定周边围岩,江面注浆加固时,盾构机周围浆液采用水泥-磷酸^[8]双液浆,距离盾构机 2 m 以上的位置采用水泥-水玻璃双液浆,注浆原则以注浆压力控制为主、注浆量控制为辅;另外注浆压力控制值须兼顾盾构机密封所能承受的限值,通过注浆流量控制来延缓注浆压力的快速提升。

2.5 滞排处置措施

2.5.1 设备改制

在穿越江底时,江中破碎岩层裂隙倾向多变,且共轭节理发育,盾构掘进过程中岩体易产生临空面而倾倒或崩塌,频繁遭遇盾构前方大石块掉落、堆积仓底,进而导致滞排严重。为此可进行设备改制,如适应性地调整刀盘辐条开口大小,增加格栅以减小粒径通过的尺寸;改制 P02 泵出口的形式,利用旁路环流冲洗气泡仓底部;根据破碎机油缸行程判断滞排程度,并据此扩大排泥管吸口和分流器格栅尺寸等^[9]。

2.5.2 提升泥浆指标

由于江底断裂带地层基本无造浆能力,造成维持开挖面稳定和携渣能力的减弱。建立了调整池回收浆液—拌浆箱—膨润土和高分子材料掺入—高稠度大比重新浆至调整池的系统^[10],以持续补充优质泥浆。

2.5.3 开仓

对采取设备改制、提升泥浆指标以及动态调整推进参数等措施后仍无法解决大石块带来滞排的问题,可采用人工进仓清理滞排石块的措施^[11]。带压、常压开仓施工流程图见图 3、图 4。

2.6 其他措施

由于地层复杂,双线盾构穿越破碎硬岩期间,大石块频繁撞击刀具、卡住刀盘,造成大量刀具异常受

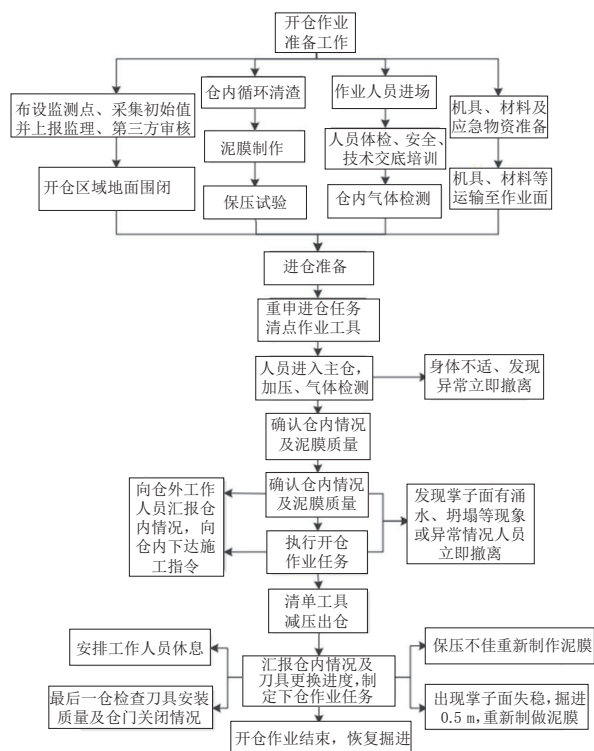


图3 带压开仓施工流程图

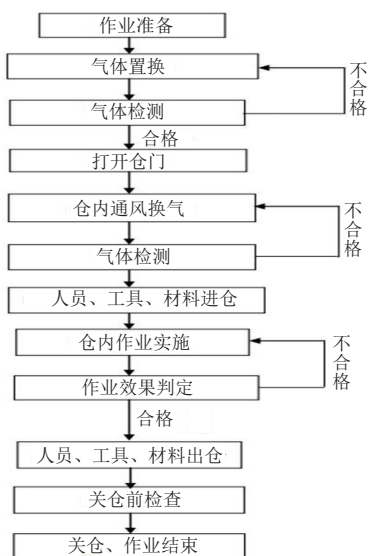


图4 常压开仓施工流程图

损和搅拌棒被扭断多次;因功效极其低下而造成盾构机超长期使用,进而致使破碎机^[12]油缸密封损坏,刀盘牛腿和中心回转连接螺栓出现大规模异常断裂,排泥系统部件磨损严重。为保障设备安全,须完善盾构机保障体系,做到勤检勤修。

3 成本分析及索赔建议^[13]

3.1 原合同和概算外发生的成本

3.1.1 江中硬岩爆破预处理成本

根据初勘显示,区间存在多处且连续高强度的硬岩,为确保施工正常及保证效率,盾构掘进前对上软下硬处岩层进行爆破预处理。此处费用为概算内未考虑费用。

3.1.2 江中应急处置系统成本

在盾构机穿越江底的施工期间,由工程船/交通船和警戒船组成应急处置系统。工程船上配备足够的应急设备和材料,作业人员 24 h 待命,并定期进行应急演练,以便处置各类应急突发事件。此项费用主要以设备租赁费及人工费的形式体现,与工期成正比。

3.1.3 江中加固成本

江中加固主要分为以注浆量主控江中砂层加固、以注浆压力为主控的上软下硬边坡加固、以加大加深加密布孔为原则的应急填仓加固这3类。

江中加固成本构成主要由钻孔费用(元/m)、注浆量(元/m³)、封孔(元/m)、验证取芯(元/m)和材料费组成。

江中加固施工工艺为:江底埋入套管护筒→钻进成孔→下放袖阀管→注入套壳料→分级后退注浆→封孔→钻进破碎袖阀管→多次封孔。但不同类型的加固形式对护筒埋置深度、单位注浆量、破碎袖阀管长度、封孔次数均有个性化要求,须考虑降效所增加的成本。

江中加固成本统计和分析见表1、表2。

表1 江中加固成本统计

序号	项目名称	单价/元	砂层加固			填仓加固	边坡加固	
			工程量	总价/元	工程量	总价/元	工程量	总价/元
1	钻孔/m	283.40	9 359.90	2 652 595.66	8 300.80	2 352 446.72	16 634.80	4 714 302.32
2	注双液浆/t	457.80	665.10	304 482.78	925.81	423 835.82	3 550.86	1 625 584.19
3	封孔/m	87.20	6 366.30	555 141.36	7 342.19	640 238.97	12 227.40	1 066 229.28
4	验证取芯/m	872.00	280.09	244 238.48	88.00	76 736.00	489.20	426 582.40
5	水玻璃/t	1 530.00	212.03	324 405.90	1 100.23	1 683 351.90	1 183.14	1 810 204.42
6	材料(水泥)/t	580	467.41	271 097.80	1 639.58	950 956.40	2 367.72	1 373 278.13
小计				4 351 961.98		6 127 565.81		11 016 180.75

表 2 江中加固成本分析

序号	项目名称	工程量/m ³	单价/元	合价/元
1	砂层加固	4 163.63	1 045.23	4 351 961.98
2	填仓加固	3 692.12	1 659.63	6 127 565.81
3	边坡加固	7 399.77	1 488.72	11 016 180.75

3.1.4 设备改制及其他措施成本

地质异常复杂性和突变性,造成盾构施工风险呈指数级增大,施工工效严重降低,盾构机和泥水设备、干化设备等租赁和维保周期远超预期;同时为保障设备安全,多次更换盾构机管路、阀门、人仓配件、仓内维修刀盘和破碎机配件并进行针对性设备改制。此项成本主要以备件费为主。

3.1.5 开仓作业成本

根据现场实际数据进行统计分析,除刀具正常磨损须进行的开仓外,因刀具异常损坏、仓内设备改造、滞排、搅拌棒及刀盘修复、应急填仓等原因引起的开仓,均属于概算外的成本。

3.2 原合同和概算内未充分考虑的成本

3.2.1 新浆材料成本

由于岩层富有裂隙水且大量轴封水的加入,使得本身无造浆能力地层的泥浆指标急剧降低,易造成泥浆稳定开挖面失稳和携渣能力大幅度减弱。施工过程中大量使用膨润土与高分子拌制的新浆,持续补充高黏度、高比重的循环浆液,并根据实际工况动态调整配合比。实际成本增加额应核减去原合同和概算已经考虑的成本。

3.2.2 推进降效引起的成本

盾构穿越江底正交断裂带,导致推进工效急剧降低,有效推进速度仅 1.5 mm/min;且滞排引起多次长时间停机处置才能恢复施工,其中停机时间约占总耗时的 57.46%,导致过江工期由原双线掘进共 5 个月变为双线掘进 35 个月结束。由此除引起人工费增加之外,盾构机、泥水处理系统、电机车等后配套机械设备的租赁费已经超过了设备原值;盾构间歇性停机期间,盾构油脂、黄油等消耗性材料仍需投入使用,以确保设备安全。泥水盾构穿越江底断裂带的成本分析汇总见表 3。

3.3 索赔建议

现有勘察手段无法在暗埋地下做围岩产状、节理分析。但是,根据真实施工地质反映出的地层特性与勘察报告有重大差异,属于重大的不利物质条件^[14],且构成情势变更^[15]。因此,对工期顺延和费用补偿进行重新协商调整,具有法律和合

表 3 成本分析汇总

单位:万元

概算清单项目	概算外清单项目	概算金额	概算内增加费用	概算外金额
盾构机掘进		5 520.145 0	18 627.874 7	
其他概算项		7 094.732 1		
	江中硬岩段爆破预处理			3 789.086 7
	江面注浆(含材料)及应急船			3 424.395 7
	设备改制及其他措施成本			131.592 5
	开仓作业成本(处理滞排、换刀作业)			3 720.399 0
小计		12 614.877 1	18 627.874 7	11 065.473 9
合计		12 614.877 1	29 693.348 6	

同坚实依据。

4 结 语

(1)泥水盾构在江底穿越断裂带的施工难度有诸多不可预见性,断裂构造复合区往往呈现张剪复合力学特性。张性断裂发育导水通道,与区域性含水层连通形成高渗透网络;压性断裂则构成阻水屏障,形成局部高压滞水区,这种导-阻水系统的空间耦合提高了管片接缝渗漏突涌风险。工程实践中,交叉断裂带易导致地层差异风化带的发育,致使隧道轴线会穿越软硬交替的复合地层界面。此类地层不仅加剧了刀具的非均匀磨损,更易诱发盾构推进系统的动态失稳。对此应采取多重勘察手段来提供符合实际情况的地质成果。另外,设计阶段应在设计概算中增加相应技术处置费用,以降低施工过程中的费用风险。

(2)该工程施工过程中遇到了极其复杂的地质条件,所增加的一系列注浆加固措施是合理的;应急填仓—江面加固以稳定盾构机周边地层—再带压开仓的措施可行。但由此使得成本相应增加。

(3)从合同和概算外发生、原合同概算内未充分考虑这两方面进行成本分析,层次合理,构成明确。从重大不利物质条件的判定及已构成情势变更角度对工期和费用进行索赔,说服力较强。

参考文献:

[1] 郑扬. 跨海盾构隧道穿越断层破碎带失稳机理与预加固方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
[2] 竺维彬, 钟长平, 黄威然, 等. 盾构施工“滞排”成因分析和对策研

(下转第 307 页)