

浅埋盾构隧道水下岩溶处治与施工控制技术

朱考飞^{1,2}, 张可能^{1,2}, 毛亚军³, 薛子斌³, 曾辉⁴

(1.中南大学地球科学与信息物理学院,湖南长沙410083; 2.有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,湖南长沙410083; 3.中建隧道建设有限公司,重庆401320; 4.北京紫荆香市政工程有限公司长沙分公司,湖南长沙410004)

摘要:长沙地铁5号线晚朝区间盾构下穿浏阳河,隧道覆土浅,洞身全风化砾岩及上部砂砾层工程性质较差。隧道底板中风化钙质砾岩中发育岩溶,溶腔最大高度达15.8 m,主要充填物为松散圆砾及砂土。盾构下穿施工前,通过搭建水上作业平台,采用快速可控袖阀管注浆技术,高效处治岩溶。盾构下穿施工过程中,面对浅覆土水下掘进、富水地层、底板发育岩溶及侧穿桥梁桩基的复杂条件下,采取多项关键技术,有效规避风险,工程顺利高效,相关技术经验值得借鉴参考。

关键词:水下隧道;盾构施工;岩溶处治;注浆;施工技术

中图分类号: U455.49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)10-0016-05

Underwater Karst Treatment and Construction Control Technology for Shallow Shield Tunnel/ZHU Kao-fei^{1,2}, ZHANG Ke-neng^{1,2}, MAO Ya-jun³, XUE Zi-bin³, ZEN Hui⁴ (1.School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 2.Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 3.China Construction Tunnel Corp., Ltd., Chongqing 401320, China; 4.Beijing Zijingxiang Municipal Engineering Co., Ltd., Changsha Branch, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: Shield tunneling of Changsha Metro Line 5 crossed Liuyang River where the tunnel was covered with shallow overburden and the engineering properties of the whole weathered conglomerate and the upper gravel layer were poor. Karst is developed in weathered calcareous conglomerate in the tunnel floor with the maximum height of the cavern up to 15.8 m which is filled by loose conglomerate and sandy soil. Before shield tunneling, the fast-controllable sleeve valve pipe grouting technology was used to treat the karst efficiently on a platform built on the river. During crossing operations, several key technologies had been adopted to deal with the complex conditions, such as shallow under water overburden, water rich formation, karst developed floors, closeness to the bridge pile foundation, to avoid risks effectively, and the engineering experience is worthy of reference.

Key words: underwater tunnel; shield tunneling; karst treatment; grouting; construction technology

0 引言

近年来,在我国长江、黄河、珠江、海河、湘江等大型河流中,已修建成南京长江隧道、广深港高铁狮子洋隧道等代表性大型水下盾构隧道,以及大量城市水下盾构地铁隧道;在建武汉三阳路长江隧道、济南黄河隧道、佛莞城际铁路狮子洋隧道等代表性水下盾构隧道;我国水下盾构隧道的发展方向主要是大断面多用途、单区间长距离及深埋高水头等^[1]。

水下盾构隧道作为特殊的暗挖掘进工程,复杂地质条件具有不可完全预见性,水下盾构施工风险极高,危险性极大,其风险产生的后果往往异常严重^[2-3]。在我国南部地区,如广州、昆明、长沙、贵阳城市地铁建设中,均出现过水下盾构下穿岩溶发育区,工程进度受到岩溶发育严重制约,施工过程出现各种安全隐患。在岩溶发育区采用盾构法下穿河道时,特别是在浅覆土条件下,由于地质条件复杂,有

收稿日期:2018-07-31

基金项目:中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目“长沙红层岩溶对水下地铁隧道的影响研究”(编号:2018zzts071);湖南省建设行业科技计划项目“岩溶发育区浅埋盾构隧道下穿河道风险分析及施工关键技术研究”(编号:KY2017050)

作者简介:朱考飞,男,汉族,1996年生,硕士研究生在读,从事地质工程、地铁隧道方面研究工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学校本部地学楼106室,zkfgeo@csu.edu.cn。

通信作者:张可能,男,汉族,1962年生,教授,博士生导师,博士,从事岩土工程基础理论、设计和施工技术研究和教学工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号中南大学校本部地学楼113室,ken@mail.csu.edu.cn。

可能出现河堤河床塌陷、盾构机姿态失控、管片错台严重、浆液流失、隧道透水等危险情况^[4-5]。通常在盾构隧道施工中,通过控制盾构掘进参数,减少超挖,加强同步注浆及二次补浆可以规避部分风险。常规操作很大程度上依靠施工经验,难以达到精确快速、安全可控的目的,在实际盾构隧道施工中仍存在较大隐患^[6-7]。盾构隧道在岩溶发育区下穿河道施工过程中,高效地处治河道底部的岩溶是保障盾构施工的前提条件。

长沙市地铁 5 号线晚报大道站—朝阳站区间盾构下穿浏阳河,勘察揭露水下中风化钙质砾岩中发育岩溶,工程中针对岩溶发育特征,通过袖阀管注浆有效地处治了岩溶^[8-9]。在盾构掘进过程中,采取多项措施保障施工安全和质量,盾构下穿浏阳河施工过程顺利,工程经验值得借鉴参考。

1 工程概况

1.1 场地条件

长沙地铁 5 号线晚报大道站—朝阳站区间下穿浏阳河(参见图 1),工程选用 ZTE6250 型复合式土压平衡盾构机施工,盾构机由朝阳站始发向南掘进至晚报大道站。根据勘察资料及设计图纸,本区间在里程 YDK33+700~ZDK33+900 范围内穿越浏阳河及两侧防洪大堤,隧道底部最大埋深约 33.08 m,隧顶距河底最小竖向净距为 7.4 m。本区段地面高程 31.00~38.50 m,河床高程 22.00~24.00



图 1 盾构下穿浏阳河平面示意图

m,浏阳河年平均水位 30.08 m;周边地形变化较大,分别为河床、河漫滩、浏阳河一级、二级冲积阶地。万家丽快速路跨浏阳河大桥处于盾构施工影响范围内,盾构需两次侧穿桥梁桩基,桩基距离线路最小距离分别为 5.38、6.72 m。

勘察资料显示,河道内从上至下依次为粉细砂、圆砾、全风化砾岩、中风化钙质砾岩,圆砾层厚约为 0.35 m,层顶标高约为 20.42 m。区间左、右线隧道穿越地层均为全风化砾岩,隧道上覆少量卵石、粉细砂。勘察期间浏阳河水位为 26.50 m 左右,该段属于富水地段,地下水与浏阳河存在直接水力联系,补给快。初勘及详勘阶段均在隧道底部中风化钙质砾岩内揭露岩溶,并进行了岩溶补勘。

1.2 盾构施工风险

盾构下穿浏阳河区段隧道顶距离河底最小约 7.4 m,洞身所处地层为全风化砾岩,上部为第四系砂卵石层(较薄)。隧道在掘进时,地层中含水量较高,应防止全风化砾岩因遇水软化而降低强度。在钻孔揭露裂隙发育地段,有产生突涌的可能,要防止掌子面突涌、坍塌。在浏阳河底部掘进过程中,渣土含水量会明显上升,容易导致螺旋输送机发生喷涌,造成前方掌子面塌陷,进而引起河床大面积塌陷;同时掘进到该处时,盾构机姿态易出现偏差,可能出现管片上浮,造成管片错台、漏水等,对隧道成型质量有重大影响;且易发生盾尾漏浆、铰接处漏水等情况;在水下掘进时上部地层稳定性较差,水土压力变动频繁,需特别注意控制土压力,防止击穿河床。

2 水下岩溶发育特征

盾构下穿浏阳河区段中风化钙质砾岩地层中发育有岩溶,勘查中多个钻孔揭露溶洞,勘察显示岩溶均处于隧道结构底板以下。岩溶发育情况见表 1,钻孔分布见图 2。

表 1 岩溶发育特征

孔 号	钻孔与隧道 净距/m	溶洞高 度/m	与底板 距离/m	充 填 物 情 况
M5Z1-017	距右线 5.6	0.7	24.0	无充填
M5Z3-LYH-03	距左线 4.6	15.8	11.4	半充填;26.0~27.2 m 无充填,27.2~41.8 m 粘土、砂、砾石
M5Z4-LYH-001	距左线 4.6	15.8	12.3	半充填;27.0~27.9 m 无充填;27.9~42.8 m 中粗砂,含部分粘土、圆砾
M5Z4-LYH-002	距左线 4.6	13.0	16.0	全充填;30.7~32.5 m 松散粉细砂;32.5~43.7 m 松散圆砾、中粗砂及 30%粘土

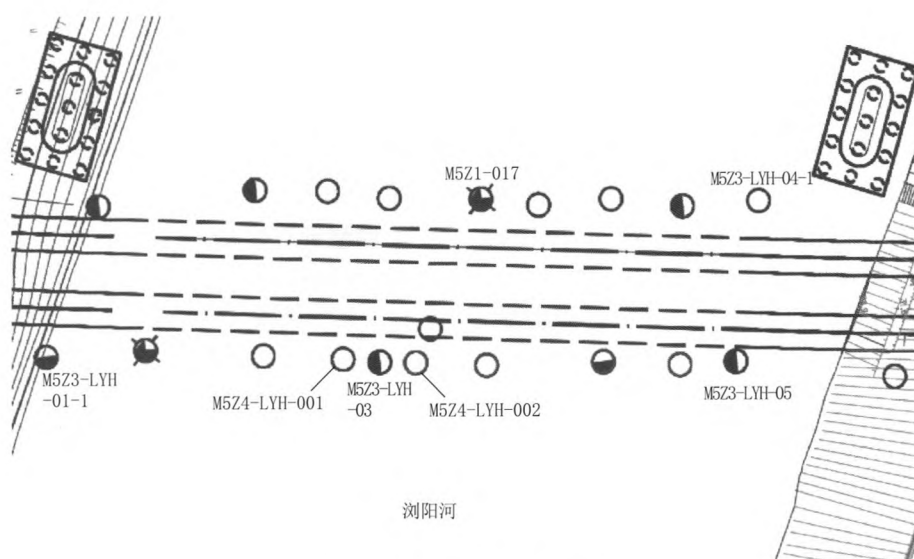


图2 钻孔揭露岩溶分布图

根据区域地质资料及工程中的初勘、详勘和岩溶专项补勘报告,本区段浏阳河水下岩溶的发育特征主要有^[10]:

(1)溶腔充填状态较好。浏阳河水下中风化钙质砾岩岩溶中,仅溶腔顶部1~2 m范围内无充填,其余深度范围均有岩层溶蚀风化残积物堆积,主要为圆砾、砂土及粘土。

(2)发育位置受地质构造控制。区域地质图显示,东山镇—石桥断裂(F132)在浏阳河附近与隧道线路相交,对下伏基岩完整性存在一定影响。在构造应力作用下,砾岩易产生张裂隙,形成地下水入渗带或风化淋漓带,岩体质量进一步降低^[11]。

(3)溶蚀作用受岩性控制。白垩系钙质砾岩成岩时间短,部分为泥质胶结,岩石胶结作用弱,属于软岩。碎屑物母岩成分主要为灰岩、泥灰岩、砂岩、板岩等。钙质砾岩中含有较多可溶性成分,在地下水作用下易溶蚀崩解。

3 水下岩溶处治

为确保盾构下穿浏阳河期间的安全顺利,防止出现河床塌陷、盾构机磕头等风险,在盾构掘进之前需要对水下溶洞进行预加固处理。工程中通过搭建水上作业平台,采用袖阀管双液注浆技术有效处治了勘察揭露的岩溶。

3.1 作业平台搭建、全套管钻进

由于是对水下的岩溶进行处治,根据前期钻探揭露的岩溶位置,布设注浆孔。首先在水上搭建漂

浮作业平台,常规平台搭建可采用汽油桶组装、竹筏、钻探船等,此处选用两艘船连接拼装,在两船中间架设平台,设置注浆机。由于河道宽度较小且河水流速不大,作业平台通过抛锚及侧向拉锚定位。

钻探平台经常受到水流冲击的影响,给钻进工作造成很多困难,为防止水流对钻具的冲击,保证钻进顺利进行,必须下入足够强度的套管进行全套管钻进。其主要作用为隔绝水流的冲击为钻孔起导向作用,同时防止注浆过程中浆液溢流至河道内,污染河水。钻进过程中要求跟管钻进直至穿过砂砾石层进入完整基岩5~20 cm。进入基岩后,无需继续跟管钻进,常规钻进至岩溶区域即可。现场作业条件见图3。

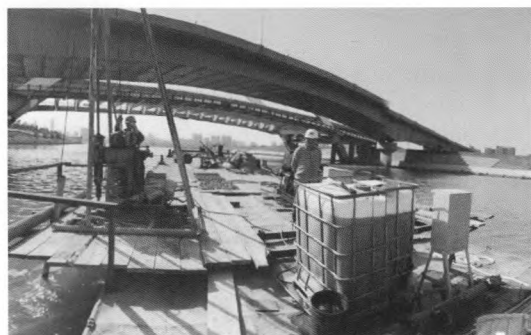


图3 浏阳河水下岩溶注浆作业平台

3.2 快速可控注浆

注浆孔钻进完成并采用清水洗孔后,立即将套壳料通过钻杆泵送至孔底,自下而上灌注套壳料至孔口溢出符合浓度要求的套壳料原浆液为止。返浆后立即依次下入按注浆段配备的袖阀管和注浆心

管,下管时及时向袖阀管内加入清水,以克服孔内液体浮力并减少管体弯曲,保证袖阀管顺畅下入至孔底。

待套壳料凝固并达到相应强度要求时,即可开始注浆作业。通过注浆心管注入双液浆时,浆液从心管末端的注浆器(或称花枪)喷出,由于注浆器上下两端均设置有止浆塞,以此控制浆液仅在心管两端止浆塞形成的封闭空间内,防止浆液在心管和袖阀管之间上下流窜。在袖阀管橡胶套和止浆塞的双重作用下,迫使浆液仅在该注浆段范围冲破袖阀管橡胶套,并向外挤破套壳料(即开环)进而横向进入地层,达到注浆加固设定深度地层的目的。注浆过程需要把控的要点主要如下。

3.2.1 套壳料配置

套壳料由膨润土及水泥组成,主要用于封闭袖阀管与钻孔孔壁(或套管)之间的环状空间,防止注浆时浆液上下流窜。套壳料浇注的好坏是保证注浆成功与否的关键,套壳料要求其脆性较高,收缩性要小,力学强度适宜,即要防止串浆又要兼顾开环。根据工程中的要求,套壳料凝固时间和强度增长速率应控制在1~2 d内强度达到1 MPa。套壳料需要根据现场配比实验,确定时间-强度关系,根据设计强度要求选择合适的浆液配比和凝固时间。

3.2.2 开环

即在注浆的前期阶段,使用高压浆液冲破袖阀管橡胶套及外侧套壳料凝结体。根据套壳料配比实验确定的凝固时间,确定套壳料强度满足要求后,使用稀浆(或清水)加压开环。在加压过程中,关注注浆机压力表变化,一旦出现压力突降,同时进浆量剧增,表示浆液已经冲破橡胶套并胀裂套壳料,开始向地层中流动,开环完成。开环后即按设计浆液配比,调节浓度开始正式注浆。

3.2.3 可控分层注浆

采用前进式分层注浆技术,选用水泥-水玻璃双液浆,水灰比为1,水泥浆-水玻璃体积比为1:0.5,现场根据钻孔深度、注浆位置及充填情况适当调节浆液配比,以达到最佳的初凝时间。同时,需要保证浆液具有较好的抗分散性,必要时可在浆液中加入适量膨润土,提高浆液稠度,确保浆液在地下水丰富的情况下能够达到较好的充填加固效果。

在注浆管下至岩溶空腔顶部时,首先开环注浆将溶腔顶部密实加固,减少浆液向周边地层及向上

串流,即形成盖板。待顶层浆液充填岩溶顶部空腔并凝固达到一定强度后,下移注浆管进行下一段注浆,从上至下依次对岩溶充填物进行加固,进行前进可控分层注浆,由此逐步实现对岩溶充填-挤密的效果。

3.3 旋转提升快速封孔

在通常的地面注浆中,封孔作业往往被忽视。水下岩溶注浆需要重视封孔。若封孔不当或封孔不严,将导致河水或河底泥砂流入注浆孔内,影响注浆质量。封孔作业时要求缓慢旋转提升套管和注浆管,同时注入速凝双液浆,保证浆液能够在套管旋转提升过程中迅速封住注浆孔。不允许直提套管,防止对地层产生扰动,影响注浆效果。且必须在旋转提升之前开始注入调制的速凝双液浆,保证提升过程中的防水效果。

4 盾构施工控制技术

根据风险分析,盾构在浏阳河底部掘进时,需要面对浅覆土水下掘进、富水地层、底板发育岩溶及侧穿桥梁桩基的复杂条件,为确保掘进作业进展顺利及施工安全,工程中采用了多项关键性控制技术。

4.1 盾构试掘进

为确保盾构机顺利下穿浏阳河,在临近下穿段预先设置下穿浏阳河试验段,并充分总结相同地层盾构掘进参数(如土仓压力、注浆参数、出土量控制等),形成下穿浏阳河试验段报告,分析优化后作为正式下穿区段盾构施工指南,确保盾构顺利下穿浏阳河。试掘进期间进行风险模拟演练,根据风险制定针对性的方案,加强施工过程中的风险处治能力,同时预备相应的风险处治物资。

4.2 皮带机出渣量实时称重

盾构机始发前,在原有皮带输送机上加装皮带称重装置,掘进过程中利用传感器技术,自动化监测出渣量,同时通过基于LabVIEW程序语言的皮带出渣量动态监测系统,实现远程控制监测皮带称重装置,分析并显示出渣瞬时流量、累计流量等数据,有效保证出渣数据的实时性。同时可实现按掘进距离进行出渣量的统计分析与显示,以及记录历史出渣数据,用于数据分析,反馈调节后续盾构施工,保证盾构机在水下掘进过程中出渣量可控^[12]。

4.3 管片复合防水

针对地层含水量高,水压较大的情况,研发出非

固化橡胶沥青涂料结合橡胶密封垫的盾构管片接缝复合防水技术,在原有橡胶密封垫的基础上,选用非固化橡胶沥青涂料,在管片接缝处整圈涂刷非固化橡胶沥青防水涂料。管片拼装后,相邻两环管片在纵向挤紧力作用下,橡胶密封垫压缩,同时非固化橡胶沥青涂料粘连成整体,形成双层止水屏障^[13]。非固化沥青防水涂料能够长时间保持弹塑性粘稠胶体状,始终与基层保持粘附性,使得隧道管片接缝处能承受更大的耐水压力,长期保持不透水性,起到良好的防水作用,确保浏阳河水下区段盾构管片达到良好的防水效果。

5 结论

长沙地铁5号线晚报大道站—朝阳站区间盾构下穿浏阳河,面对浅覆土水下掘进、富水地层、底板发育岩溶及侧穿桥梁桩基的复杂条件下,采取多项关键技术,有效规避风险。通过搭建水上作业平台,针对钙质砾岩岩溶充填度较高的特点,选用袖阀管注浆技术充填加固溶腔,并优化注浆施工方案,采取前进式可控分层注浆,有效处治岩溶。盾构掘进施工前进行试掘进优化各项掘进参数,施工中采用皮带出渣量动态监测系统控制出渣量,并研发出盾构管片接缝复合防水技术,有效应对富水地层盾构管片防水问题。

盾构下穿浏阳河施工过程中,各项风险源均得到有效处治,水下掘进作业顺利完成,未对周边环境

造成影响,成型隧道质量优良,工程经验值得借鉴参考。

参考文献:

- [1] 肖明清.我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势(英文)[J].隧道建设(中英文),2018,(3):360-371.
- [2] 张姣.越江隧道盾构法施工的风险评价方法及应用[J].公路工程,2017,(1):174-177.
- [3] 卢浩,施焯辉,戎晓力.水下隧道盾构法施工安全风险评估探讨[J].中国工程科学,2013,(10):91-96.
- [4] 张智博.南京长江隧道大型泥水盾构施工风险分析及对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(6):65-69.
- [5] 史磊磊,郭彩霞,苏忍,等.北京地铁14号线土压平衡盾构隧道穿湖风险分析[J].市政技术,2015,33(2):94-96.
- [6] 张继清.超浅埋大直径盾构穿越海河的设计施工关键技术[J].中国铁路,2015,(7):69-73.
- [7] 郭信君,闵凡路,钟小春,等.南京长江隧道工程难点分析及关键技术总结[J].岩石力学与工程学报,2012,(10):2154-2160.
- [8] 杨裕尧,范大明.压力注浆技术在京福客专临湖特大桥岩溶地基处理中应用探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):65-68.
- [9] 王伏春,乐应,白江红,等.强岩溶地区主过水通道注浆封堵技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(1):76-79.
- [10] 张可能,张岳,廖阳,等.贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析[J].中国岩溶,2018,(2):300-306.
- [11] 彭柏兴,刘颖炯,刘毅.红层溶蚀风化特征及其工程影响[J].岩土工程学报,2011,33(S1):148-152.
- [12] 夏俭.土压平衡盾构出土计量装置研制与应用[J].城市道桥与防洪,2017,(4):222-225.
- [13] 董林伟,江玉生,杨志勇,等.隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(3):469-474.