

郑州轨道交通6号线冯—昆区间盾构穿越贾鲁河段技术控制

关占明¹, 王立平², 刘海彬¹, 秦晓毅¹, 陈 豪¹

(1. 平煤神马建工集团有限公司, 河南 平顶山 467000;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘 要:针对郑州轨道交通6号线冯湾站—昆仑路站区间穿越贾鲁河段所遇水文地质和环境条件极易导致河底开裂、渗漏及不均匀沉降的施工风险,介绍了从准备工作、盾构选型、管片设计、设置试验段、施工参数控制、渣土改良、注浆技术、监测及巡视工作等方面制定了详尽的技术及处置措施并付诸实施的全过程,相关隧道工程质量及环境得到了保证和保护,且技术方案可为城市中盾构施工穿越既有河道提供经验或参考。

关键词:轨道交通;盾构;穿河;施工参数;监测

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

文章编号:1673-5781(2023)03-0973-05

0 引 言

随着我国城市轨道交通建设的快速发展,地铁隧道的数量与规模日益增长^[1-3]。作为一种绿色交通模式,,地铁能很好地缓解城市交通拥堵和减少环境污染,因此,进行地铁建设是利国利民的重大举措。盾构法作为目前城市地铁施工的首选,具有技术先进、经济、安全、对地层扰动小等诸多优点^[4-6]。区别于山岭隧道、水底隧道,地铁隧道的特殊性就在于多处于城市地下。山岭隧道较多使用的是矿山法。对于水底隧道,国内厦门翔安海底隧道^[7],天津海河隧道^[8],南水北调穿黄工程^[9],珠江隧道^[10]等均具有成功的施工经验,具体环境不同,施工方法及应对风险源的技术措施也各不相同。城市地铁隧道位置的特殊性决定了采用传统施工技术会受到很大的限制,而且在穿水隧道中具有较大优势的泥水平衡盾构也由于在城市中存在泥浆处理不便,对环境影响大等弊端而常被土压平衡盾构所取代。

作为城市景观的重要一环,河道在美化环境方面发挥了重要作用。但进行地铁建设不可避免也会穿越各种天然或人工河道、水道。常采用的土压平衡盾构法在穿越河道时,本身也具有风险性,加之地下水位和周围环境的影响,若设计和施工技术措施不当,极易造成河底开裂,地下水位下降,隧道淹水,地面沉降等严重后果。由于盾构穿越河道工程和一般地下隧道工程存在显著区别,必须重视下穿河道过程中可能产生的各类风险,通过优化设计参数,控制施工参数以及加强监测和保护来提供安全保障^[11-12]。王明胜^[13-15]等结合工程实践,提出了在复杂地质条件下盾构穿越河流的盾构施工参数,可给工

程实践带来一定的借鉴意义。

本文针对郑州地铁6号线冯湾站—昆仑路站区间盾构穿越贾鲁河所面临的施工风险,从准备工作、技术措施、隧道自身及周边环境监测等角度进行介绍,并对风险进行确认与分析,目的在于减少贾鲁河风险源对盾构施工带来的影响,保证隧道工程质量,有效控制地表位移及地下水位。

1 冯—昆区间及风险源——贾鲁河工程概况

郑州轨道交通6号线主要位于中心城区,整体呈西南—东北走向,全长50.1 km,共设车站31座。冯湾站—昆仑路站区间作为线路的一部分,位于郑州市中原区,向东敷设,起点位于待建芳草路和芳菲路交叉口东侧,左线长度为1 569.684 m(含短链1.116 m),右线长度为1 570.8 m,线间距为13.0~16.2 m。区间主要为拆迁场地,地形起伏较大,地貌单元属山前冲洪积倾缓平原区。勘探揭露79 m深度范围内主要为人工填土、粉质黏土、粉土、黏质粉土等土层。地下水类型为第四纪松散岩类孔隙潜水,稳定地下潜水水位埋深介于3.0~29.9 m,补给主要有降水入渗、地表水下渗、地下水侧向径流等。

区间隧道下穿贾鲁河,风险源对应里程范围为ZDK10+571.371—ZDK19+779.474,YDK19+573.260—YDK19+779.977。区间下穿贾鲁河纵断面图如图1所示。河底高程为113.74 m,河底无衬砌。冲刷线为河底下2.54 m,下穿处隧道埋深约为27.51 m,隧道结构距离河底最小净距为8.86 m,区间距离冲刷标高最小净距为6.3 m。同时区间下穿直径为2 m的生态输水管道,竖向最小净距为5.05 m。贾鲁河未做

收稿日期:2022-05-16;修改日期:2022-07-20

基金项目:河南省住房和城乡建设科技计划项目(科技示范J-2101),河南理工大学博士基金(B2019-34)''

作者简介:关占明(1975—),男,河南襄城人,高级工程师;

王立平(1979—),男,山西阳泉人,博士,讲师。

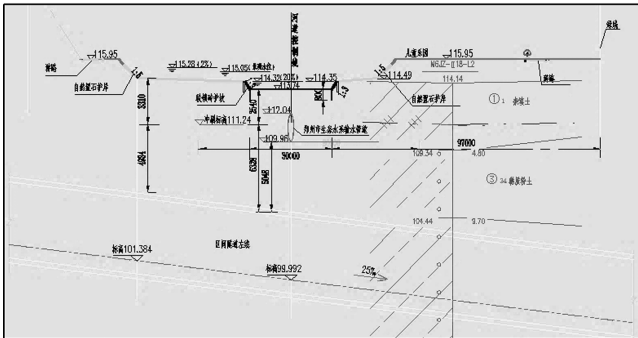


图1 区间下穿贾鲁河纵断面图

防渗处理;生态输水管道为玻璃纤维增强塑料夹砂管,距离上部河底竖向1.7 m,综合判定该处风险属于Ⅱ级环境风险源。贾鲁河之下隧道穿越土层主要为具有可塑性的③22粉质黏土及③34黏质粉土,黄褐色及褐黄色,均含较多钙质结核,有砂感或近似砂岩,钻进较困难。

隧道区间下穿贾鲁河,紧邻生态输水管道,且整段处于地下水水位以下,盾构施工中极易引起河底及生态输水管道的开裂、渗漏、不均匀沉降等风险,因此,必须采取严格的保护措施。

2 区间下穿贾鲁河道及输水管道主要保护措施

2.1 准备工作

施工前应和贾鲁河相关单位取得联系,呈报施工方案,获得相关单位的许可和配合,并对穿越前影响范围内的河道进行彻底的检查和维修。由河道管理单位指派合格的人员进行现场监督,保证河道相关设备安全。成立施工安全领导小组,做好人员分工,层层分解,动态管理。

为适应区间地质条件,采用中铁装备的CTER259号和CTER260号两台土压平衡盾构机进行掘进。盾体直径 $\varnothing 6\,462\text{ mm}$,开挖直径 $\varnothing 6\,480\text{ mm}$,刀盘开口率为52%,配置中心鱼尾刀、刮刀、撕裂刀、超挖刀,刀具高低配置。做好材料的调配、验收、运输、储存、保管等工作,保证盾构各系统部件及盾尾密封完好,做好设备的维修、保养及管理。施工前做好应急预案,准备好应急物资。做好人员的培训,组织人员学习,做好技术交底。做好测量、试验、监测等准备工作。

2.2 技术措施

贾鲁河段盾构穿越地层主要为粉质黏土层、黏质粉土层,为增大土体流动性,向刀盘前方注入泡沫对渣土进行改良。为保证地面沉降在允许范围内,在穿越之前,首先设置100 m的试掘进段,积累最佳掘进参数。在掘进过程中要控制好掘进参数,避免不必要的停机。

2.2.1 试验段及正常段掘进参数

通过计算得到前100 m掘进参数,在此基础上确定正常段掘进参数。土仓压力根据实际土压设定,并根据地层埋深、地下水位变化与地面环境及监测实际进行调整,采用1.2~1.4 bar;盾构总推力为700~1 100 t,刀盘扭矩为2 500~3 500 kN·m;做好螺旋输送机的转速与盾构推进千斤顶推进

速度的协调,避免因超挖或欠挖,引起地面变形,掘进速度为20~30 mm/min,出碴量为59 m³,注浆量为6 m³,注浆压力2~4 bar,泡沫注入50~80 kg。按各项初定参数掘进时,需要根据实际情况灵活转换。分区操作推进油缸来调整盾构机姿态,纠正偏差,将盾构机的方向控制调整到符合要求的范围内。

根据盾构穿越贾鲁河段施工(管片环号63—86号)实际掘进参数的控制情况来看,刀盘转速介于1.0~1.2 r/min,刀盘扭矩为1 800~3 500 kN·m,土仓压力介于1.0~1.5 bar,掘进速度介于60~90 mm/min,总推力800~1 000 T,同步注浆压力为3.1~3.6 bar,注浆量为5.2~6 m³,出碴量为57~60 m³。实际出土量控制在理论值的110%~120%,且不超过60 m³,以维持一定土压力,保证盾构正面土体的稳定。

2.2.2 渣土改良

泡沫采用发泡剂原液与水按照一定比例(1:90~1:100)混合组成泡沫混合液,通过发泡装置经压缩空气作用生成大量气泡,通过输送管压入盾构刀盘前,注入速度控制在50~100 L/min。利用刀盘和土仓壁上的搅拌棒将泡沫与切削下来的土体加以搅拌,使其充分混合,从而分离和中和黏性土中的阴阳离子,降低其吸附性能,起到改善渣土的流动性和润滑刀具的作用。

2.2.3 衬砌管片及防水措施

衬砌环采用通用型,环宽1 500 mm,外径为6 200 mm,内径为5 500 mm,管片楔形量为40 mm(双面)。环分块采用1块封顶块,2块邻接块及3块标准块。结合贾鲁河段管片承载及防水要求,管片强度等级采用C50。拼装方式采用错缝拼装,从下往上,先标准块再邻接块最后封顶块。左右交叉,纵向插入,封顶成环,管片连接采用弯螺栓。为避免管片拼装时因应力集中被破坏,管片环、纵缝应设传力衬垫。

防水设计遵循“以防为主、刚柔结合、多道防线、因地制宜、综合治理”的原则。以结构自防水为主,抗渗等级为P12。迎土面裂缝宽度不大于0.2 mm,不得有贯通裂缝。管片构造上,环缝和纵缝面设一道弹性密封垫槽和嵌缝槽。密封垫采用三元乙丙,嵌缝密封胶采用聚氨酯,螺栓密封圈采用遇水膨胀橡胶。加强变形缝、预埋件及各种接头的防水措施,确保区间隧道整体防水性能。

2.2.4 同步注浆参数控制

同步注浆可抑制地层沉降,防止渗水,应进行严格管理。同步注浆充填系数取1.30~1.80。对浆液参数控制,胶凝时间为3~10 h,固结体强度 $\geq 0.2\text{ MPa/1d}$, $\geq 2.5\text{ MPa/28d}$;浆液结水率 $>95\%$,稠度为8~12 cm,倾析率(静置沉淀后上浮水体积与总体积之比)小于5%。同步注浆材料配合比见表1。

表1 同步注浆材料配合比

水泥/kg	粉煤灰/kg	膨润土/kg	砂/kg	水/kg	外加剂
150~200	320	80	600~900	460~500	根据试验加入

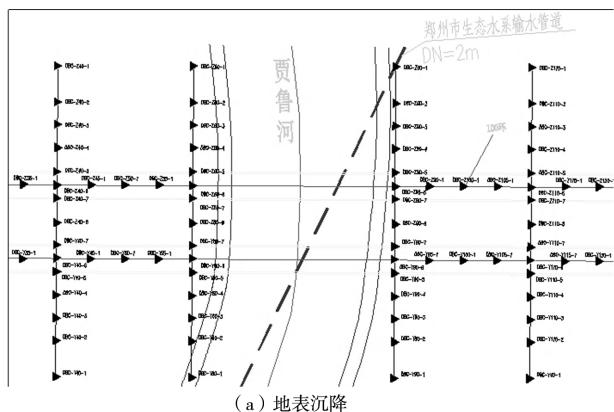
由于贾鲁河段距离始发井较近,当盾构始发试掘进达到100 m(67环),同步注浆浆液强度达到1.0 MPa时,即可拆除

反力架及负环管片。

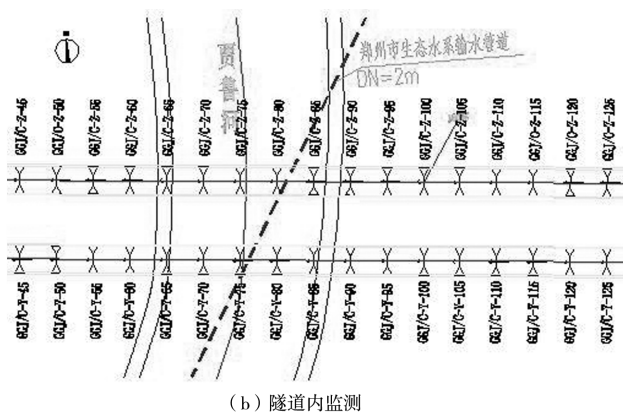
2.2.5 二次注浆参数控制

作为同步注浆的补强,由于同步注浆无法全部满足沉降要求,通过注入水泥-水玻璃双液浆进行地面沉降控制。在左右线穿越河道前后一倍洞径范围的管片增设注浆孔。管片拼装时的吊装孔兼作二次补强注浆的注浆孔。

二次注浆浆液配合比:水:水玻璃=3:1(重量比);水泥浆:水灰=1:1(重量比);水泥浆:水玻璃浆液=1:1(体积比)。注浆压力一般为0.3~0.5 MPa,二次注浆在盾尾脱出5~10环后进行,注浆量可根据现场沉降监测资料进行动态调整。



(a) 地表沉降



(b) 隧道内监测

图2 监测布点图

管片竖向位移利用盾构腰部管片的螺栓作为监测点。净空收敛测点布置在每个监测断面的两侧拱腰处。以GGJ/C-Z(Y)-65为例,GGJ代表净空收敛,GGC代表管片竖向位移,Z代表左线,Y代表右线,65代表环数。始发端至下穿贾鲁河段约200 m加密净空收敛和管片结构竖向位移监测点,每5环一个测点。净空收敛采用手持式激光测距仪(T-60,测量精度为1 mm),管片竖向位移采用电子水准仪(Trimble DiNi03,测量精度为0.3 mm/km)。

在地面上布置平行于隧道轴线的竖向位移监测点和垂直于隧道轴线的竖向位移断面监测点。以DBC-Z(Y)-60-7为例,DBC代表地表竖向位移监测点,Z代表左线,Y代表右线,60代表环数,7代表该断面测点编号。在贾鲁河西侧至始发端约95 m和贾鲁河东侧约60 m加密监测点,沿中线每5环一个测点,每30 m一个监测断面,加密布设7个断面,每个断面15个测点(含轴线测点),测点横向布置在中心线外,监测点间距依次为3 m、5 m、5 m、5 m、8 m。地表沉降(或隆起)采用电子水准仪(Trimble DiNi03,测量精度为0.3 mm/km)。由于贾鲁河段距离始发段较近,因此在始发段布置1个水位监测孔,采用水位计对地下水位变化进行监测。

2.4 加强巡视

对贾鲁河段首次巡视时重点调查河床及周边地表的裂缝情况,对已有裂缝记录宽度并采用拍照方式进行影像资料存档。日常巡视观察裂缝、地表隆陷、隧道内部渗漏水、管片破损及错台等情况。若发现新增地面裂缝或发展速率超过预警值、地面隆陷、隧道内渗水等异常情况应及时通

2.3 加强监测

做好监测工作,建立施工数据联动平台,实现各参与单位数据共享。建立完善的监控量测体系,出现异常数据,应及时通知各单位。施工监测应满足《城市轨道交通工程测量规范》(GB/T 50308—2017)、《工程测量标准》(GB 50026—2020)等规范及标准。

贾鲁河段监测对象主要侧重于地表竖向位移、隧道内管片竖向位移和净空收敛的监测。盾构区间测点先于盾构掘进100 m开展埋设工作,测点布置完成并待其稳定后,在盾构掘进前进行初始值的采集工作,监测点布置如图2所示。

报,并拍照存档。除日常巡视外,特别应注意汛期巡视工作。

3 区间自身及周边环境监测结果

随着工作面的推进,按规定的测读时间,记录水位监测孔的水位变化情况;对工作面前方及后方一定范围的地表竖向位移监测点(涉及编号DBC-Y(Z)90-1至DBC-Y(Z)312-1间所有测点),工作面后方一定范围的净空收敛和管片沉降监测点(涉及编号GGC-Y(Z)-1至GGC-Y(Z)-170间所有测点)进行监测,记录后分别计算各点的沉降速率及累计沉降量,并在此基础上统计出诸多监测点在测读时的最大正、负方向位移累计值(并观察此监测点的速率),最大正、负方向速率点(并观察此监测点的位移累计值)。若各项目监测结果不超过表2中的控制值,则表明区间自身及周边环境均处于安全稳定状态,可正常施工。

表2 各监测项目的控制值

监测项目	速率/(mm/d)	累计值/mm
地表竖向位移	-4/3	-30/10
管片竖向位移	±2	±15
净空收敛	±3	±24
地下水位	±500	±1000

特将右线掘进153环至掘进279环管片,工作面后方的管片竖向位移监测结果如图3所示。

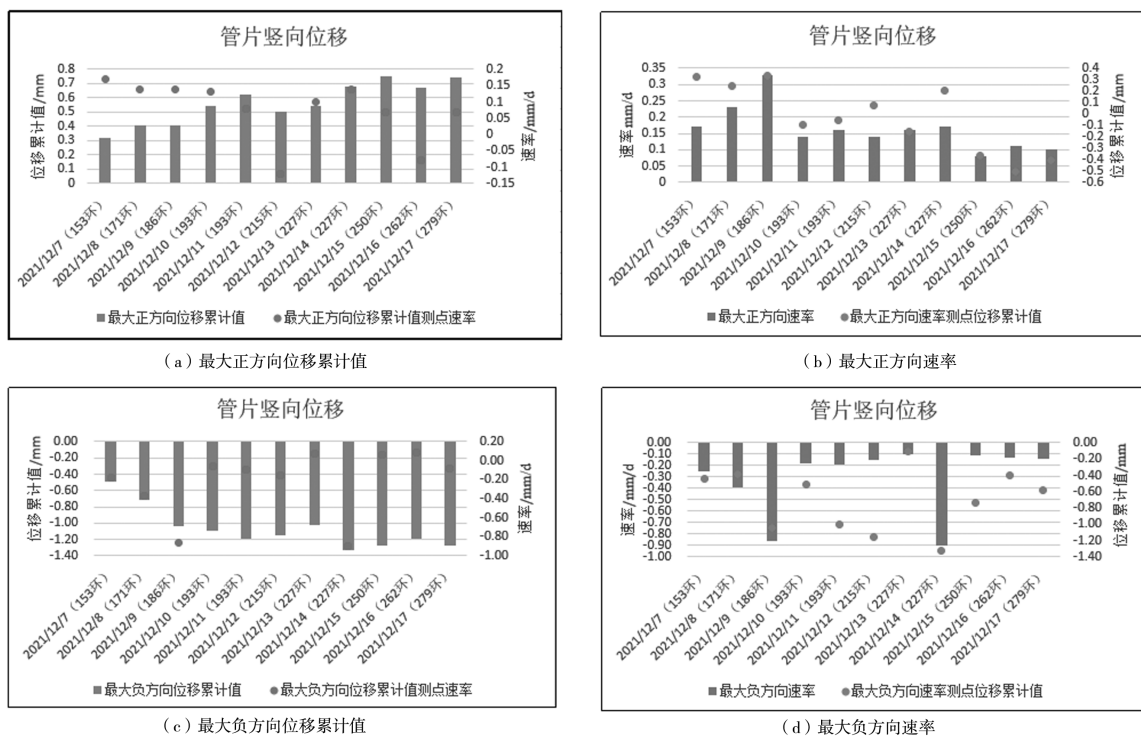


图3 管片竖向位移监测结果

如图3(a)所示,推进到153环,存在一最大正方向累计值测点 GGC-Y-45,随着工作面的推进到171环,最大正方向累计值测点变为 GGC-Y-15,且此点随着工作面推进会继续发生正位移、正累计值增加,推进到215环,此点转而会发生负位移,导致正累计值减小,推进到227环,发生最大正方向累计值的测点变为 GGC-Y-15,且在后期随着工作面推进,此监测点继续发生正位移,推进至262环转为负位移,推进至279环变为正位移,后续继续跟踪监测,较长一段时间此监测点一直为最大正方向累计值点。

随着工作面的推进,对最大负方向位移累计值进行统计分析,如图3(c)所示,也同样发现其对应的监测点会发生变化。究其原因也是由于随着工作面推进,测点并不一直是负向位移、正向位移的出现,导致累计值会发生变化。但无论如何,图3(a)和图3(c)统计所得的最大位移累计值及对应测点的速率均没有超过表2中的控制值。

观察掘进过程中,最大正方向速率[图3(b)]和最大负方向速率[图3(d)]以及各自对应测点的位移累计值也没有超过表2中的控制值。隧道净空收敛和地表竖向位移统计分析方法和隧道管片竖向位移相同,限于篇幅,不再赘述。监测结果满足表2要求。对推进过程中水文监测孔的监测,发现最终累计变化量为66 mm,变化速率最大值为17 mm/d,也在表2控制值之内。

因此,通过上述监测方法,对所有的测点能够做到兼顾而不遗漏。对监测项目位移速率和位移累计值的控制可使施工隧道的质量和安全得到保证,超出范围应采取必要的技术措

施。通过日常巡视,隧道也没有出现明显渗水及管片破损及错台现象。

4 结束语

郑州轨道交通6号线冯—昆区间隧道下穿贾鲁河,紧邻生态输水管道,且整段处于地下水位以下,极易引起河底及生态输水管道的开裂、渗漏、不均匀沉降等风险,给盾构能否顺利通过带来了一定的技术挑战。通过对准备工作、盾构选型、管片设计、设置试验段、施工参数控制、渣土改良、注浆技术以及巡视配合监测等各环节认真落实,通过此技术使难题得到了很好的解决。盾构施工从始发端至下穿贾鲁河段的施工方案可行,安全可靠,是城市中盾构穿越既有河道的又一成功案例,技术方案可为城市中盾构施工穿越既有河道提供经验和参考。

〔参考文献〕

- [1] 王宇通,王新线,赵林. 复合地层地铁隧道工程技术发展概述[J]. 现代城市轨道交通, 2021(S1): 17-20.
- [2] 胡长明,张文萃,陆征宇,等. 基于突变理论的盾构下穿危旧房屋及河流段风险评价与控制方法研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1221-1227.
- [3] 李保虎. 城市轨道交通盾构法隧道施工工艺研究[J]. 工程建设与设计, 2022(2): 124-126.
- [4] 赵方彬. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 工程建设与设计, 2018(20): 191-192.

(下转第981页)

表 12 宽桥中载跨中位移(单位:mm)

跨中横隔板厚		400	300	200	100	0
梁编号	1	-9.48	-9.50	-9.53	-9.58	-9.75
	2	-9.27	-9.32	-9.45	-9.72	-11.01
	3	-9.19	-9.27	-9.39	-9.65	-10.50
	4	-9.23	-9.26	-9.31	-9.44	-10.10
	5	-9.41	-9.44	-9.49	-9.55	-9.79
	6	-9.41	-9.44	-9.49	-9.55	-9.79
	7	-9.23	-9.26	-9.31	-9.44	-10.10
	8	-9.19	-9.27	-9.39	-9.65	-10.50
	9	-9.27	-9.32	-9.45	-9.72	-11.01
	10	-9.48	-9.50	-9.53	-9.58	-9.75
最大/最小		1.03	1.03	1.02	1.03	1.13
差值/%		0	-0.52	-0.76	-0.19	9.54

6 结论与建议

本文以某省院 30 m 跨径小箱梁标准图为基础,用 3 片梁和 0.5 m 湿接缝组合出全宽 9.1 m 窄桥,用 10 片梁和 0.5 m 湿接缝组合出全宽 29.4 m 宽桥,变化跨中横隔板的高度、厚度、数量、位置,全面分析了不同跨中横隔板的设置方法对各片主梁协同受力性能的影响,主要结论与建议如下:

(1) 建议跨中横隔板的高度宜等于主梁全高或由于施工

要求略低于主梁全高。

(2) 设置一道及以上厚度 0.2 m 跨中横隔板后,各片主梁协同受力能力相差不大,因此推荐设置一道跨中横隔板。

(3) 若需要设置多道跨中横隔板,建议设置奇数道,并保证一道位于跨径中心,对各片主梁协同受力更有利。

(4) 跨中横隔板厚度在 0.2 m 及以上时,对于窄桥、宽桥,各片主梁协同受力能力相差不大,因此推荐厚度为 0.2 m。

(5) 30 m 预制小箱梁在端部设置两道梁端横隔板,跨中仅设置一道跨中横隔板,宽度为 0.2 m,高度等于或略低于主梁全高,可基本满足各片主梁协同受力的要求,推荐采用。

〔参考文献〕

- [1] 吴国瑜,史光军,李志栋. 25m 跨径组合箱梁跨间横隔板影响分析研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(3): 238-240.
- [2] 邓洪元,肖凯龙,郇稳定,等. 横隔板参数对装配式箱梁宽桥受力的影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2019, 31(1): 62-65, 72.
- [3] 谢金成,张焕荣,万淑敏,等. 横隔板对装配式小箱梁力学性能的影响[J]. 工程建设, 2021, 53(3): 45-48, 78.
- [4] 于金琪. 横隔板设置对小箱梁的作用[J]. 四川建筑, 2009, 29(1): 135-136, 138.
- [5] 赵巧燕. 预制拼装小箱梁结构横隔板设置的影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(6): 230-232.
- [6] 朱万勇. 预制装配式小箱梁跨中横隔板设置数量对结构整体受力影响分析[J]. 北方交通, 2020(9): 19-21, 25.
- [7] 朱虹,孙瑜,董志强,等. 基于压电陶瓷的灌浆套筒缺陷检测及应力传播模拟研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 117-126, 4.
- [8] 王腾辉,陈权,夏文传,等. 基于 ABAQUS 塑性损伤的半灌浆套筒力学性能有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3709-3715.
- [9] 高润东,肖顺,李向民,等. 非正常灌浆对钢筋套筒灌浆连接接头受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(5): 117-121.
- [10] 崔建东. 复合地层盾构下穿珠江施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2022, 7(3): 48-50.
- [11] 李自力,潘青,曹志勇,等. 盾构长距离下穿越河流数值模拟及施工参数优化设计研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 442-449.
- [12] 夏润采. 土压平衡盾构下穿河道段施工风险评估与控制措施研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(2): 58-64.
- [13] 王明胜,徐军哲,倪冰玉. 复杂地质条件下盾构法穿越新造海施工技术[J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 52-56, 62.
- [14] 杜建华. 广州地铁三号线盾构法穿越珠江施工技术[J]. 铁道建筑, 2008, 48(10): 41-44.
- [15] 黎水昌,李洋溢,秦鲜卓. 下穿黄河强透水砂卵石地层隧道施工参数研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(3): 31-35.

(上接第 964 页)

- [3] 高强,赵唯坚. 高应力反复拉压作用下堆焊成型套筒灌浆连接性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 220-227.
- [4] 张雪峰,李丕伟,夏晋,等. 锈蚀钢筋套筒灌浆连接混凝土结合界面直剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(1): 120-126.
- [5] 余毅斐,周德源,张晨昕,等. 基于小波包分析的装配式剪力墙套筒灌浆缺陷检测[J]. 结构工程师, 2022, 38(1): 53-60.
- [6] 余琼,唐佩妍,张星魁,等. 搭接长度对套筒灌浆搭接接头反复拉压力学性能影响试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 690-702.

(上接第 976 页)

- [5] 高延伟,翁子才,张照煌. 盾构技术在隧洞施工中的应用分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(6): 502-507.
- [6] 关辉辉,王军,刘中心. 石家庄地铁 1 号线土压平衡盾构施工掘进参数研究[J]. 铁道建筑, 2015, 55(12): 39-42, 99.
- [7] 卫海宏. 厦门翔安海底隧道突水、突泥事故预防和处理措施[J]. 施工技术, 2015, 44(S1): 206-209.
- [8] 贺春宁. 天津海河沉管隧道设计综述[J]. 隧道与轨道交通, 2021(2): 14-19, 29, 64.
- [9] 华夏,文军,吴庆红. 南水北调中线一期穿黄工程盾构施工效率分析[J]. 人民长江, 2011, 42(16): 83-84, 105.
- [10] 崔建东. 复合地层盾构下穿珠江施工技术研究[J]. 工程技术研