

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.02.058

蓉江四路越江隧道工程设计关键技术

豆世康¹,彭可云²,刘艺¹,肖彬²,温竹茵¹

[1.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092;2.中国建筑股份有限公司,北京市100000]

摘要:赣州市蓉江四路越江隧道总体方案设计过程中,对隧道、桥梁方案,从工程层面对工程地质风险、方案可靠性、可实施性和工程经济性等方面进行了比较,按综合效益最优的原则,确定采用暗挖隧道方案,并对越江隧道土建、防水排水、防灾疏散等设计及施工关键技术进行介绍。在地质条件适宜的条件下,蓉江四路越江隧道工程实践证明,采用水下隧道越江是较优及可行的。

关键词:城市道路;水下隧道;防排水;工程设计

中图分类号: U452.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0266-05

0 引言

赣州市蓉江四路越江隧道为连接凤岗片区与蓉江新区之间的重要通道^[1]。蓉江新区与高铁片区之间通道极少,越江交通需求矛盾越来越突出。位于凤岗片区的昌赣高铁和机场T2航站楼均于2020年建成运营,商务区建设也全面启动。蓉江新区作为城市未来发展的主中心,建设现已全面启动。未来两片区联系将更加紧密,仅靠创业大桥进行联系,无法支撑地区发展。蓉江四路过江隧道连接凤岗片区与蓉江新区,该工程的建设将极大加强两组团间的联系,完善越江设施布局,如图1所示。



图1 蓉江四路越江隧道区位

赣州中心城区打造骨干路网构建城市框架,由“一环四横六纵”快速路网组成,全长172 km。蓉江四路穿越章江国家湿地自然保护区(赣州市区段),

收稿日期:2023-02-16

基金项目:中国建筑股份有限公司科研项目(CSCEC5B-2020-02);

上海市政工程设计研究总院集团有限公司科研项目(K2019K168);

软弱互层超浅埋小净距大断面穿江隧道安全建造关键技术研究

作者简介:豆世康(1978—),男,硕士,高级工程师、注册土木工程师、注册一级建造师、注册监理工程师、上海市建设工程评标专家,从事隧道与地下工程设计研究工作。

章江上游为章水和上饶江汇集。章水发源于崇义聂都山,流经大余县、南康区,在三江口汇成章江,河流流经富产钨、银、铅、锌、稀土等矿产。因此,本项目章江水域明挖施工方案,环评方案难度很大,施工易造成赣江下游重金属超标,对下游百姓用水造成难以估计的影响。

经详细勘察、多方案多轮深化及专家论证比选,从中长期综合社会效益、经济效益的角度考虑,确定蓉江四路越江段采用隧道方案,满足工程建设与市民需求。其设计、建设过程以防排水、治水为主线,建成一座具备交通疏解、过河等多项功能的城市水下隧道。隧道方案经受住了建设的检验,成为江西省内隧道设计的一项重大创新。

1 方案决策

1.1 桥隧方案比较

结合赣州近远期交通规划,经征求赣州市各职能部门意见,越江通道决策存在高架桥梁方案、隧道方案两大方案。

(1)桥梁方案。桥梁起点位于规划客家大道西延线以东,为保证横向黄竹堆路贯通,桥梁起坡坡度为5.5%,接地点距离客家大道西延交叉口约90 m,主桥段纵坡为0.5%,如图2所示。根据相关水文资料,100 a一遇洪水水位标高为109.86 m,通航水位标高为107.126 m,主桥标高保证不低于117.5 m,满足通航要求。蓉江新区段大桥上跨滨江路与紫心草路后接地,桥梁长约1.75 km。桥梁方案工程造价低,方案北侧接地点距离客家大道交叉口较近,交叉口服务水平较差。客家大道西延交叉口以北高架道路已施工通

车,再修建桥梁衔接,整体景观性和协调性较差。

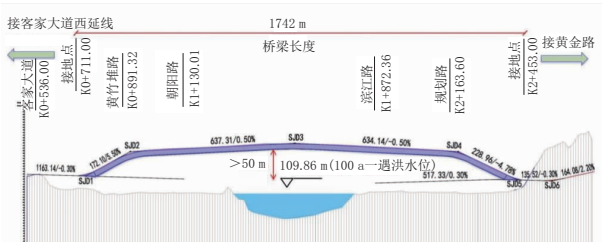


图2 桥梁方案纵断面设计

(2)隧道方案。隧道北起规划客家大道西延线以东,为保证客家大道西延交叉口运营良好,避免隧道接地点距交叉口过近,隧道采用5%纵坡迅速下穿,进入朝阳路以南处设置的北岸工作井,北岸工作井覆土为9m,保证黄竹堆路贯通。矿山法段越江隧道控制江底隔水顶板覆岩厚度大于10m,采用4.5%、0.5%、5%纵坡组合,如图3所示。经多方面论证后认为,长隧道有利于实现暗挖隧道安全埋深及南北岸接线交通便捷,最大限度保护三江口稀有的景观资源,应优先采用暗挖隧道方案。

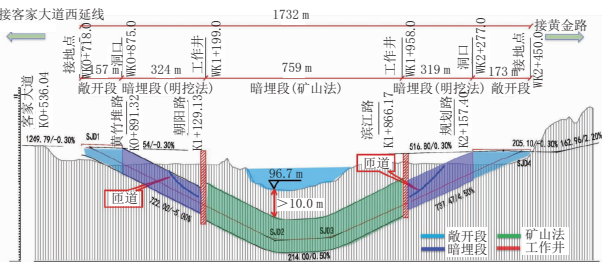


图3 隧道方案纵断面设计

1.2 方案综合比较

综上所述,桥梁方案与隧道方案均能保证横向路网的贯通。桥梁方案工程造价较低,方案北侧接地点距离客家大道交叉口较近,交叉口服务水平较差。同时,越江通道距离上犹江与章水合流处下游约700m,城市景观效果较差。隧道方案虽造价较高,但对片区土地价值的提升有显著效果,同时景观效果好。目前赣州市越江通道多为桥梁,沿线连续建设桥梁景观效益差,综合城市片区的规划定位与景观要求,蓉江四路推荐采用隧道方式过江。综合工程技术与社会影响两方面因素,推荐采用隧道方案。

2 隧道设计

2.1 隧道主体结构

(1)总体设计原则。根据总体方案,蓉江四路隧道起点位于客家大道西延以南,终点位于黄金路以北,K0+619.89~K3+117.00,全长约2.5km。隧道东线长约1.745km,西线长约1.739km,匝道长约1.3km,两侧接线地面道路长约0.76km。江中段双向六车

道,按双洞隧道设计,隧道内净空面积为90m²(含仰拱),扁平率0.6(路面上高度/宽度)。暗挖段二次衬砌承受全部荷载,水压力取值按1/100水位设计,1/300水位校核^[2]。初期支护按满足施工安全和控制地面沉降要求设计。

(2)隧道主体结构设计。由于地形地质条件千差万别,以及隧道断面形状、施工方法、支护措施的强弱和施作时机,与围岩、隧道结构的承载状态高度相关,要准确进行隧道的荷载与受力计算是极其困难的。因此,基于隧道工程实践的类比设计是极好的设计方法。该隧道采用工程类比法设计,收集我国已建水下道路隧道的设计案例,进行围岩条件和设计参数对比分析,并选择适宜的计算模型和方法,对结构设计参数进行检算,保证支护参数经济合理、施工安全和工程的长期安全稳定(见图4~图6)。全隧东线、西线暗挖段共有800m,暗挖段隧道采用复合式衬砌。

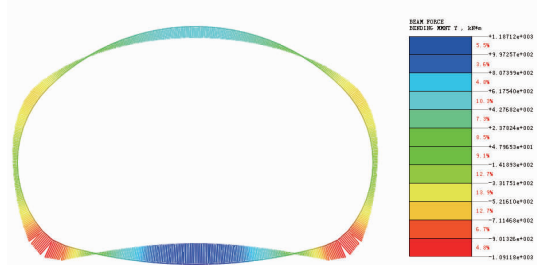


图4 弯矩

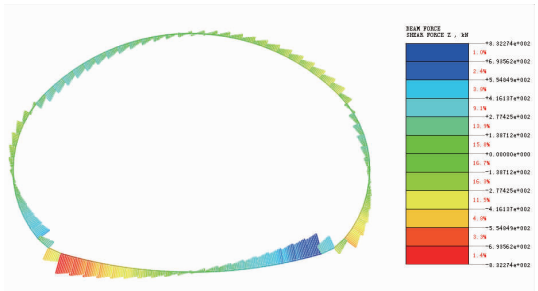


图5 剪力

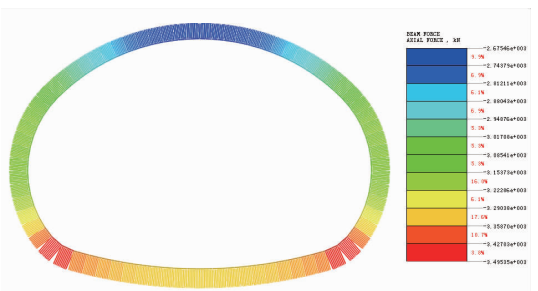


图6 轴力

根据计算内力进行结构设计和配筋验算,地震荷载作用不控制结构设计。拟定的隧道断面和尺寸能够满足强度、刚度、稳定性的要求。隧道结构进行裂缝检算,裂缝基本不控制结构配筋,隧道抗浮也满

足要求。结构截面的弯距值和轴力值较大,按基本组合内力值计算配筋,具体设计参数见表1。

表1 蓉江四路越江隧道主体结构设计参数

项目	单位	围岩级别			
		VIb	VIa	Va	
喷射混凝土	C30	cm	30	30	30
拱部/系统边墙	直径	mm	Φ25	Φ32/Φ25	Φ32/Φ25
			Φ32/Φ25	Φ32/Φ25	Φ32/Φ25
锚杆拱部/边墙	布置	cm	400/500@100	400@100	400@100 ×
			×50	×75	60
钢筋网	直径	mm	φ8@20 × 20	φ8@20 ×	φ8@20 × 20
			20	20	20
钢架	工字钢	型号	I22a@50	I22a@75	I22a@60
			/cm	/cm	/cm

注:a为水下段,b为洞口段。

(3) 支护设计

a. 超前支护。超前支护是初期支护等措施施工前不能满足掌子面稳定的场合而采取的辅助措施,其目的是控制其前方的超前变形、掌子面挤出变形及掌子面拱部塌方掉块,以保证施工安全和周围环境安全。超前支护可以起到梁效应、拱效应、强化围岩效应。该隧道超前支护采用4 m长超前φ42小导管、洞口30 m长超前φ108大管棚,通常根据类似工程经验进行设计。

b. 地层加固。蓉江四路越江隧道掘进穿越断层破碎带和围岩裂隙发育等不良地质。这些都是隧道安全施工的影响因素。为确保隧道暗挖施工安全,对水下覆岩厚度较薄地段及岸边地层软弱段采取地层加固处理。加固采用高压旋喷桩满堂加固(如图7中斜线阴影区),桩径800 mm,桩长2~14 m。

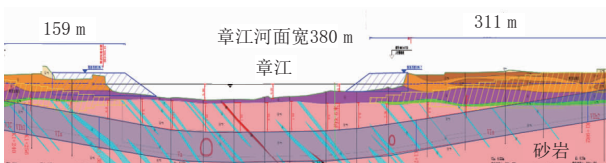


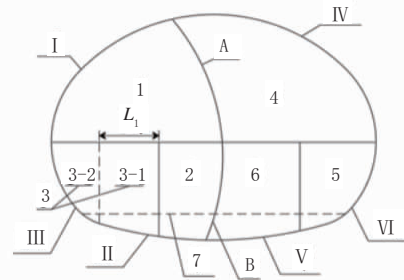
图7 隧道加固纵断面设计

c. 临时支护。蓉江四路越江隧道全隧道采用CD法进行施工,根据工地现场采用悬臂掘进机施工的特点,将CD法优化为CD七步法,如图8所示。CD七步法是将大断面隧道分割为多个小断面,减少拱脚处围岩的暴露时间,上部各小断面利用上一循环架立的钢架施作隧道拱部小导管超前支护。

2.2 隧道防排水设计

2.2.1 隧道防水

(1)按“防、排、截、堵相结合,因地制宜、综合治理”的原则进行一级防水标准的防水设计。



注:1—左侧上导坑1部岩体;2—左侧下导坑2部岩体;3—左侧下导坑3部岩体(划分为两部分3-1、3-2);4—右侧上导坑4部,5—右侧下导坑5部;6—右侧下导坑6部;7—回填碎石;8—仰拱;9—二次衬砌;I—第一部初期支护;II—第二部初期支护;III—第三部初期支护;IV—第四部初期支护;V—第五部初期支护;A—中墙临时支撑上台阶初期支护;B—中墙临时支撑下台阶初期支护。

图8 CD七步法示意图

(2)对强富水地段导水性好的断层破碎带,开挖前采用全断面帷幕注浆止水。对裂隙水较发育段,采用周边预注浆堵水,围岩注浆止水后开挖。隧道采用全包防水型设计。

2.2.2 隧道排水

水下隧道无法顺坡自流排水,排水设计是越江隧道设计的关键。水下隧道按照“外水外排、清浊分离、分级排放”的原则^[3],应设置洞口排水和洞内排水组成综合排水系统,如图9所示。洞口为逆坡段,设置了横向截水设施,横向截水设施不得影响行车安全。

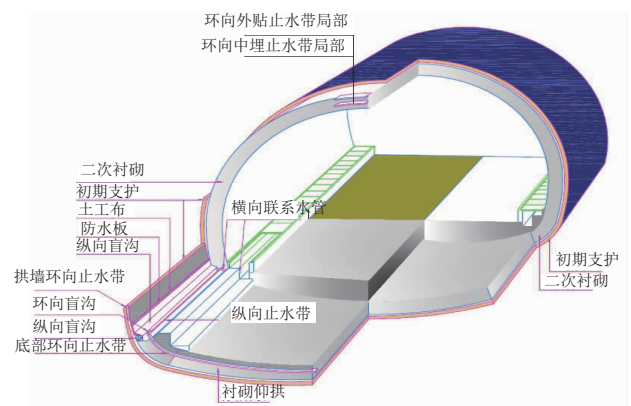


图9 隧道防排水断面

越江隧道内的排水主要有隧道洞口雨水、隧道渗漏水及消防废水^[4]。消防水量较小,一般在非正常情况下发生且量较小,故隧道洞口雨水和渗漏水是控制隧道水淹灾害的重点^[4],也是水下隧道设计的关键。

(1)雨水泵房确定。在隧道设计时,隧道洞口集流范围面积较小,借鉴地铁设计做法,隧道雨水泵房设计水量为1.2倍计算暴雨降雨水量,雨水泵房的集水池的调节容积,作为安全储备^[4]。根据赣州、广州、武汉等地暴雨强度统计,重现期P=50 a的暴雨强度

为 $P=1 a$ 的两倍。因此,雨水泵的配置按 2 台设计,可按 1 台变频水泵设置。考虑到节能和可靠性,本工程采用变频水泵,设置 1 台备用泵^[4]。

洞口路面下设截排水系统。

(2) 废水泵房确定。废水泵房设计水量由隧道渗漏水 and 消防废水组成, $Q_{废}=Q_{消}+Q_{渗}$ ^[4]。隧道消防废水仅在火灾发生时,水消防系统启用后,废水汇流到隧道内,一般持续时间不长,水量可控^[4]。隧道内渗漏水水量主要受隧道围岩渗透率、施工工艺、施工质量、管养水平、施工工法等诸多因素影响。一般按土建完成后实测隧道渗漏水水量并适当考虑一定的冗余量,相对比较准确。

蓉江四路隧道经过江西省住建厅消防专家评审后确定的消防系统采用水喷雾灭火系统($Q_{消}=3.5 L/s$)。

(3) 排水措施。全隧道洞内设双侧水沟(宽 35 cm × 深 80 cm),隧道路面两侧设浅碟型排水明沟。

2.3 隧道防灾疏散设计

隧道内的火灾危险主要有隧道本身、客车的行李、危险货物及车辆。隧道的消防安全控制目标主要有:(1)管理危险物品禁入;(2)方便救援和灭火行动;(3)提供可靠的疏散设施,减少人员伤亡;(4)隧道防灾设计实现防灾、减灾、救灾。因此,水下隧道设计必须考虑防灾疏散措施。

(1) 疏散通道。在隧道中部设置车行疏散通道 1 处并兼顾人行通道,间隔 250 m 设置 4 处人行通道。洞口外设疏散场坪和疏散道路,并设置应急值班中心 1 处。

(2) 配套设施。隧道内设自动控制与火灾报警系统、综合视频监控系统 and 事故报警电话系统。设计按 15 MW 火灾规模考虑事故通风,两回路 10 kV 电源供电。隧道结构的耐火保护采用在混凝土中添加聚丙烯纤维及在隧道内安装泡沫水喷雾消火栓灭火系统。

3 隧道施工情况

3.1 概况

本工程 2020 年 9 月 28 日开工。暗挖段采用上半断面 CD 法施工,以悬臂掘进机机械开挖为主,局部地段辅以挖机开挖。预计至 2023 年 9 月 28 日实现隧道贯通,2024 年 1 月 28 日完成隧道全部施工,建设总工期 42 个月。

3.2 特殊地段施工

隧道北口人工填土段、穿高铁片区主干道排水

涵管段、过章江段和下穿滨江路段,是蓉江四路越江隧道施工难点。其中,过江段危险性最高,如表 2 所述。穿越地层主要为泥质粉砂岩、泥质砂岩,中厚~厚层状,节理裂隙发育为 V 级围岩。隧道按“超前预报,加强支护,控制变形,快速封闭!”的原则,采用上半断面 CD 法施工。

表 2 隧道措施

地段	围岩分级	设计措施	施工措施
北口人工填土区	VI	双侧壁导坑法施工、长管棚超前支护,另设地表高压旋喷桩加固、长管棚套打小导管	地表高压旋喷加固、长管棚超前支护、设置钢架、锚杆加固、三台阶法施工
下穿排水管段	V	双侧壁导坑法施工、机械开挖与人工开挖、长管棚套打小导管	左右导坑上半断面台阶法施工、机械开挖,钢架支护
过章江段	V	三台阶临时仰拱法、机械开挖、长管棚套打小导管、掌子面注浆止水	上半断面 CD 法结合二台阶法施工、机械开挖、小导管、超前钻孔探水
下穿滨江路段	V	CD 法施工、长管棚超前支护,地表高压旋喷桩加固	三台阶法施工,双层超前小导管,地表高压旋喷加固

3.3 暗挖开挖工法

实际施工过程中又对 CD 七步法进行了多次优化,最终形成了上半断面 CD 法,更加适合悬臂掘进机施工。上半断面 CD 法洞身开挖将大断面隧道分割为多个小洞室,减小每次开挖后的围岩临空面,减少拱脚处围岩的暴露时间。洞身开挖采用悬臂掘进机开挖,炮机修边和开挖仰拱。

开挖步骤见图 10,具体施工顺序如下:

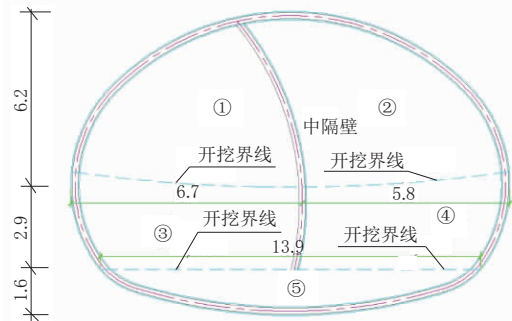


图 10 隧道开挖方案(单位:m)

(1) 左侧上导坑①部开挖前,施作该部分超前支护。

(2) 左侧上导坑①部开挖,施作该部左侧初期支护以及左侧中墙临时支护,并对右侧上导坑②部施作超前支护。

(3) 右侧下导坑②部开挖,施作该部右侧初期支护,并对左侧下导坑③部施作超前支护。

(4)左侧下导坑③部开挖,施作该部左侧初期支护及左侧中墙临时支护,并对右侧下导坑④部施作超前支护。

(5)右侧下导坑④部开挖,施作该部右侧初期支护,并对仰拱⑤部施作超前支护。

(6)拆除中隔壁。

(7)仰拱⑤部开挖,施作该部初期支护。

(8)浇筑仰拱和仰拱填充。

(9)浇筑和二次衬砌。

隧道开挖效果如图 11 所示,后行侧导洞上台阶距先行侧导洞上台阶距离 15 m。先行侧导洞下台阶距后行侧导洞上台阶距离 5 m,后行侧导洞下台阶距先行侧导洞下台阶距离 10 m。中隔壁在后行侧导洞的洞内监测数据稳定后进行拆除(连续 5 d 变形量不超过 1 mm/d),拆除位置距离先行洞掌子面不得少于 35 m,中隔壁每次拆除 3m。仰拱整幅施工,每循环进尺 5 m,并同时调整掌子面到仰拱初支的安全步距 60 m,掌子面至二衬的安全步距为 90 m。

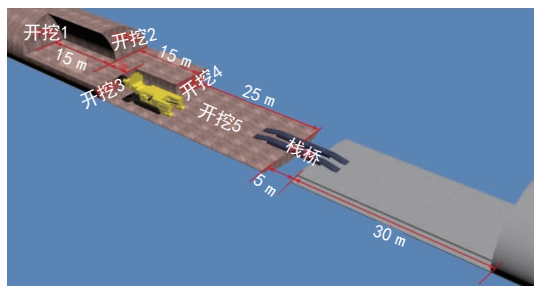


图 11 隧道开挖效果

3.4 洞顶加固效果

高压旋喷注浆采用 20~40 MPa 的高压射流破坏土体,有效改造土体,增大土体的黏聚力和内摩擦角,减小地基土的变形。隧道进洞前洞顶加固已施工完成,并现场采用瑞雷面波法进行物探无损检测。检测结论如下:

(1)对比注浆加固区内与注浆区外各测线探测结果,表明本区整体加固效果明显。

(2)根据瑞雷波速(见图 12、图 13)与地基承载力有较好的相关性,即波速越高,反映的介质层密实度或固结程度越高,相应承载力越强。所以,依据探测结果,可评判经过注浆处理的基底层波速提升明显,密实度提高,承载能力增强,达到了预期灌浆施工的效果。

根据开挖后效果及物探结果(见图 14、图 15)显示,经加固后的围岩等级及地质情况已提高,基本可以确保暗挖安全。

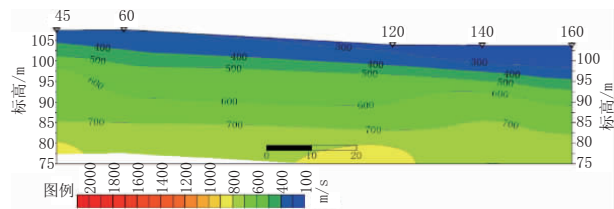


图 12 洞顶加固前瑞雷面波波速剖面

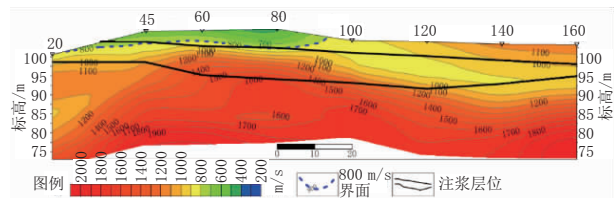


图 13 洞顶加固后瑞雷面波波速剖面



图 14 洞顶加固效果(仰坡开挖后)



图 15 洞顶加固效果(洞内掌子面)

4 结语

蓉江四路越江隧道是兼顾景观、交通、防噪、提升土地价值等综合功能的越江隧道,总体设计方案合理,隧道治水、排水、防水成果有效,隧道设计经受住了施工建设的检验。

(1)方案研究之初,对桥梁越江方案进行充分论证,引入暗挖隧道方案后,结合初步勘察成果,明确隧道方案的合理适用性。经专家多次论证,确定长隧道穿江方案。

(2)隧道暗挖段采用复合式衬砌,悬臂掘进机开挖,隧道采用全包防水型,36个月隧道土建贯通,42个月隧道建成通车。

(3)治水、排水、防水是越江隧道施工的关键。经

(下转第 293 页)

- clay[J]. Geotech. Engrg., ASCE, 1981, 107(6):759-777.
- [3] Clough, R.W., O'Rourke, T.D. Construction induced movements of in-situ walls [C]. Ithaca, N.Y.: In Proceedings, Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Special Conference, 1990: 439-470.
- [4] Ng, C.W.W. Observed performance of multi-propped excavation in stiff clay[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1998, 124(9):889-905.
- [5] Ou, C. Y., Liao, J. T., Lin, H. D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 1998, 124(9):798-808.
- [6] Hsieh, P.G., Ou, C.Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [7] Long, M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 2001, 127(3):203-224.
- [8] 徐中华, 王卫东, 王建华. 上海软土地区上海银行大厦深基坑工程的实测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4639-4644.
- [9] Zhong W. Wang, Charles W.W. Ng, Guo B. Liu. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6):1243-1254.
- [10] 王卫东, 朱伟林, 陈崢, 等. 上海世博 500kV 地下变电站超深基坑工程的设计、研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 564-576.
- [11] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(7): 985-994.
- [12] 徐中华, 王卫东, 王建华. 逆作法深基坑对周边保护建筑影响的实测分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10):88-96.
- [13] 刘铭, 李翔宇. 上海地铁车站深基坑连续墙变形的统计[J]. 低温建筑技术, 2011, 152(2):81-83.
- [14] 崖尚松. 上海地铁 M2 线曲阜路车站基坑围护墙体变形监测数据分析[J]. 广东公路交通, 2017, 151(4):104-109, 127.
- [15] 李宁, 张祥, 张得焯, 等. 考虑槽壁及坑底联合加固的上海地铁车站基坑变形特性分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(1):148-154.
- [16] 薛飞, 蒋文杰, 王天佐, 等. 上海天山路地铁车站深基坑开挖施工监测分析[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2021, 41(2):22-28.
- [17] DG/TJ08-61-2018, 基坑工程技术标准[S].

(上接第 270 页)

采取初支背后注浆、二衬背后注浆、全包防水层、局部径向注浆等注浆治水措施, 2022 年隧道日均排水量稳定在雨季 230 m³、旱季 153 m³, 均远小于设计预期。

(4) 实践证明, 蓉江四路越江隧道工程位于以弱风化泥质砂岩、泥岩地层中, 地质条件清楚, 选取恰当的工法及采取有效的治水、排水、防水措施后, 城市道路以隧道形式穿越城市中的江河湖泊的总体设计

方案是可行的。

参考文献:

- [1] 豆世康. 城市水下浅埋暗挖隧道最小覆盖层厚度确定方法[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 340-346.
- [2] 项志敏, 袁仁爱, 罗田郎. 浏阳河隧道全包型防排水系统类型及施工关键技术[J]. 给水排水, 2010(1): 137-141.
- [3] JTG/T 3371-2022, 公路水下隧道设计规范[S].
- [4] 史义雄. 高速铁路越江隧道排水泵房设计探讨[J]. 给水排水, 2014(1): 26-30.