

基于 UHPC 的隧道节点改造结构体系方案研究

米孝生,陈海斌,郭泰广

(广东省建筑设计研究院有限公司,广东 广州 510016)

摘 要:超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete,UHPC)是一种高强度、高耐久性的新型建筑材料,具有优异的力学性能和耐久性,在隧道及桥梁工程中得到广泛应用。在隧道工程领域,其已成功应用于盾构隧道管片加固、隧道衬砌、防火涂料和隧道门洞等部位,采用 UHPC 结构将隧道 U 形槽改造为闭口断面还鲜有案例。以白鹅潭大道隧道节点改造为依托,受隧道净空限制,通过对常规混凝土、工字钢、UHPC 结构比较分析,提出无筋 UHPC 连续梁加现浇板体系结构,满足了结构附加自重小、抗疲劳性能强、耐久性好等需求。UHPC 改造 U 形槽具有很好的轻型化、高承载力、经济性优和景观效果好的优点。

关键词:隧道工程;改造;UHPC;拼装;桥面板;附加应力

中图分类号:U452.2+5

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)12-0262-04

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)是 20 世纪 90 年代开发出的超高强度、高韧性、高耐久性的新型超高性能混凝土。其具有以下特点和优点。

(1)超高强度:UHPC 的抗压强度通常在 120 MPa 以上,是传统混凝土的 2 倍以上。这使得 UHPC 在承受大荷载和抵抗外部冲击力方面具有出色的性能。

(2)高耐久性:UHPC 具有出色的耐久性,能够长期抵抗化学侵蚀、冻融循环和氯盐侵入等因素的影响。这使得 UHPC 在海洋环境、高氯离子含量的地区以及寒冷地区等恶劣条件下的使用更加可靠。

(3)高韧性:UHPC 具有良好的韧性,能够在受到冲击或振动时承受较大的变形而不破坏。这使得 UHPC 在地震和爆炸等高风险区域的建筑中具有重要的应用。

(5)减少体积:由于 UHPC 的高强度和韧性,相同的结构强度可以使用更小的截面尺寸,从而减少了构件的体积和重量,这为设计提供了更大的自由度和灵活性。

在同等梁高、荷载等条件下,UHPC 梁相对常规混凝土梁,具有自重小 30~40%,桥梁高跨比小,承载力高等优势;UHPC 梁相对常规钢梁,具有抗疲劳

性能好、经济性好、防火性好、耐久性好等优势。

目前 UHPC 结构已经应用于多座桥梁和隧道加固工程,隧道领域主要应用于 UHPC 加固盾构隧道衬砌结构、盾构隧道内部梁-柱节点连接等局部构件^[1,2,4]。

白鹅潭大道隧道节点改造需要在既有 U 形隧道上新建顶板,常规方案可采用预应力混凝土结构和钢混组合梁结构,针对本项目隧道净空受限、尽可能减小既有隧道地基附加应力、耐久性好、不间断现状交通等一系列不利建设条件,需要研究一种合理的超薄结构体系。通过已有的 UHPC 桥隧工程应用案例,提出无筋 UHPC 连续梁加现浇板体系结构解决城市隧道改造难题。本文重点介绍设计应对措施的关键技术问题。

1 工程概况

白鹅潭大道(珠江隧道段)工程位于荔湾区白鹅潭商务区核心区,连接新隆沙片区及陆居路片区。建设内容包含一座珠江隧道上跨结构、上市路 100 m 和上涌直街 100 m 旧路改造,白鹅潭大道交叉口加铺改造,如图 1 所示。主要设计参数如下。

道路等级:城市次干路。

设计车速:主线 40 km/h。

车道数:双向 6 车道。

路面设计荷载:城-A 级。

抗震等级:按地震烈度 VII 级设防。

收稿日期:2023-09-23

作者简介:米孝生(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

现状隧道结构材料:S6 25 号混凝土。
UHPC 结构材料:UHPC135。
抗浮:安全系数 1.1。
最大裂缝宽度:0.3 mm。
隧道配筋:既有结构配筋满足 85 规范。
UHPC 主梁:预应力 A 类构件。

1.1 现状节点与周围建筑关系

珠江隧道敞口段共分为 13 节段,其中 F1~F4 节段与地铁 1 号线结构共壁,F5~F13 节段与地铁 1 号线结构相互分离。白鹅潭大道线位涉及珠江隧道 F4~F7 节段如图 2 至图 3 所示,该路段邻近珠江隧道格栅棚盖,珠江隧道结构宽度为 25~28 m,为双向 4 车道。

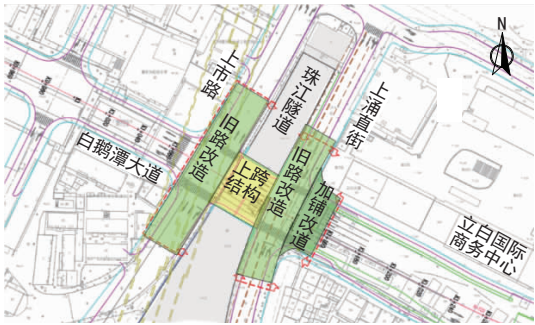


图 1 珠江隧道节点平面图



图 2 珠江隧道节点平面布置图

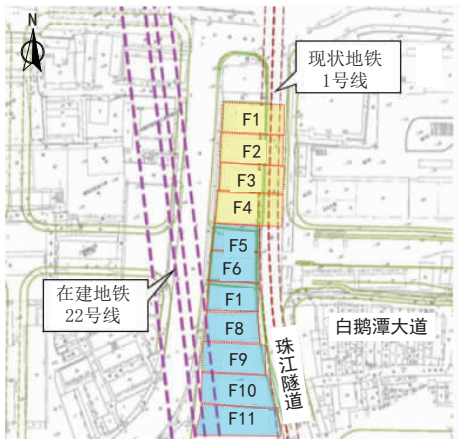


图 3 节点隧道节段与地铁关系图

1.2 现状地质条件

根据珠江隧道地质钻孔资料:F5、F6、F7 节段参考 F2、F3 钻孔,隧道底板位于微风化泥质粉砂岩,天然状态抗压强度为 7 800 kPa。

2 隧道改造设计的几点关键问题

为实现既有城市隧道 U 形槽改造为闭口断面,特定的建设条件主要体现在为净空受限、隧道与地铁较近、不改变既有隧道受力特征、尽可能减小地基附加压力增幅等。本文重点介绍结构体系比选、上部结构选择、主要计算结论 3 个关键问题。

3 方案构思

3.1 结构体系比选

上跨珠江隧道结构顶板有两种受力体系,分别为全固结刚构和连续结构体系。

完全固结结构体系横断面如图 4 所示,上跨顶板与隧道中墙及侧墙固结,形成两跨闭口框架结构体系。经过结构计算,采用闭口框架结构体系,虽然增加了结构的整体刚度,但是对隧道侧墙顶产生了附加负弯矩,侧墙受力状态发生了改变,现状侧墙配筋无法满足要求。

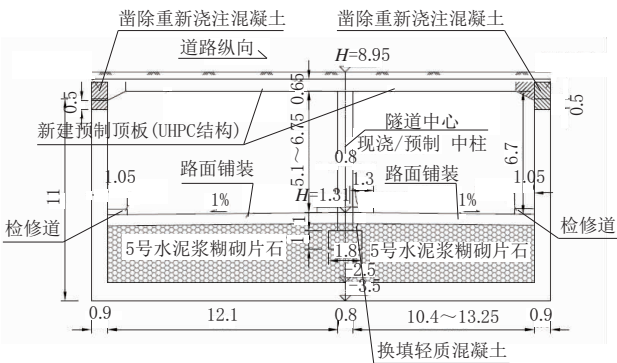


图 4 完全固结体系横断面图(单位:m)

连续结构体系断面如图 5 所示,上跨整体 UHPC 主梁吊装后,主梁与新增中柱通过高阻尼减震支座连接,主梁与隧道侧墙之间设置 GYZF4 支座。支座向侧墙外偏心 0.2 m,原结构受力状态不发生实质性改变,且对既有隧道侧墙受力有一定的改善。

连续 UHPC 结构的优点:不改变原结构受力体系、结构自重小、抗震性能好;高耐久性,更适用于海洋环境;整片重仅 105 kN,吊装施工效率高等。

综合评价,推荐采用连续结构体系方案。

3.2 上跨结构形式比选

上跨结构最大跨度为 14.6 m,新增的隧道顶板可选择的有预制 UHPC 板、密排工字钢、空心板结构^[3]。

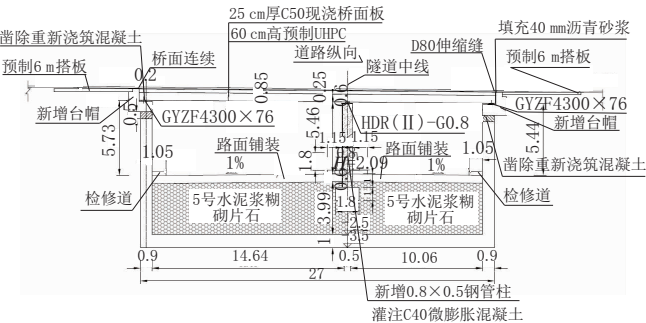


图5 连续结构体系横断面图(单位:m)

各类上跨结构优缺点总结如表1所列。

表1 主梁方案比选表

结构形式	预制 UHPC 梁 + 现浇板	密排工字钢	普通混凝土空心板
结构体系	结构连续, 结构高: 0.85 m=0.6 m 预制梁 +0.25 m 现浇板	结构连续, 结构高: 1.45 m=1.2 m 钢梁 +0.25 m 现浇板	先简支后桥面连续, 结构高: 0.95 m=0.8 m 板 +0.15 m 现浇板
施工方法	整片梁吊装重量 105 kN, UHPC 预制工艺成熟	整片梁吊装重量 58 kN	单跨吊装重量 350 kN
地基附加应力	结构自重介于钢结构和空心板结构, 对地基附加应力相对较小	结构自重较轻, 对地基附加应力最小	结构自重最大, 对地基附加应力是 UHPC 梁 3.5 倍
结构特点	1. 中柱采用高阻尼减震支座, 边支点采用滑板支座, 形成连续结构体系 2. 抗弯刚度较大, 变形较小, 舒适性好 3. 应力幅小, 耐久性好	1. 定期检修, 管养成本高 2. 同等 60 cm 梁高钢梁疲劳应力 38.5 MPa 不满足规范要求 3. 台后填土高度增加, 增加现状 U 槽侧墙受力, 侧墙裂缝宽度不满足原设计要求	1. 桥面连续隧道顶板防水存在隐患 2. 预制工艺最成熟, 结构刚度大 3. 地基附加应力最大, 对地铁影响最大
对交通影响	两跨主梁整体一次吊装到位, 临时围蔽时间短, 对现状交通干扰较小	两跨主梁一次吊装到位, 临时围蔽时间短, 对现状交通干扰较小	上部结构分两跨吊装, 对现状交通影响大
工程造价	适中	最高	最低

综合考虑隧道车行净空、施工工期、结构连接可靠性、结构刚度、隧道防水及地基附加应力, 推荐采用重量较轻、板厚较小、力学性能好、施工工期短的 UHPC 结构。

4 结构方案及分析

4.1 结构概况

现状珠江隧道 U 形槽改造为闭口断面, 顶板采用 UHPC-I 梁加现浇板结构, 新增中柱采用矩形钢管柱, 基础采用条形基础, 结构纵断面如图 6 所示。

顶板 I 梁材料采用 UHPC135, 梁高 0.6 m, 采用整体吊装工艺, 单片梁重 105 kN, 主梁横断面如图 7 所示, 预应力采用高强度低松弛钢绞线, 其标准强度 $f_{pk}=1\ 860\ \text{MPa}$, 主梁上缘采用一束 $2-\Phi_{s15.2}$, 下缘采用一束 $13-\Phi_{s15.2}$; 钢管柱截面尺寸为 0.8 m (横向) $\times$ 0.5 m (纵向), C50 现浇板厚度 0.25 m^[7]。

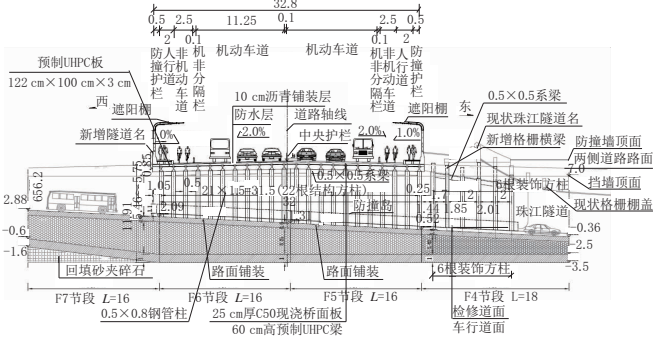


图6 隧道改造后横断面图(单位:m)

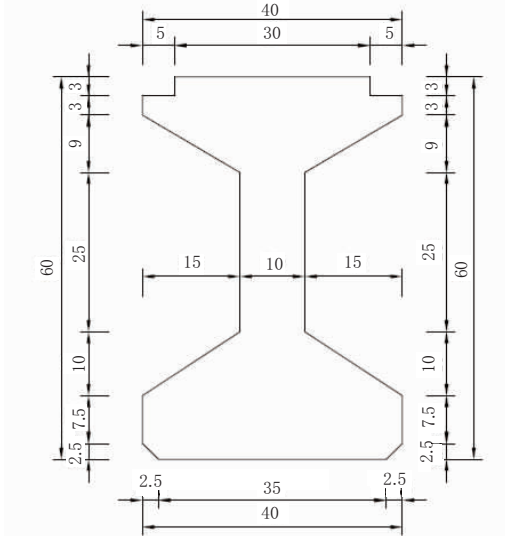


图7 UHPC 梁横断面图(单位:cm)

考虑顶板搭接在侧墙上, 凿除顶面 0.5 m, 将侧墙顶加固改造为帽梁形式。

4.1 总体模型计算

总体框架模型按新增柱间 1.5 m 建模, 桥面现浇板采用板单元, 其余均采用梁单元, 隧道底板采用只受压支撑, 荷载考虑恒载、侧土压力、顶板路面荷载、车道面荷载等^[8], 杆系单元模型如图 8 所示。

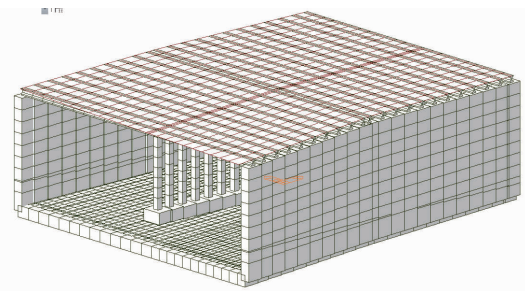


图8 结构总体模型

UHPC主梁应力如图9所示,频遇效应组合下最小压应力储备为3.9 MPa(拉) $<0.7 f_{tk}=5.81$ MPa,标准组合下最大正压应力为30.4 MPa $<0.5 f_{ck}=52.5$ MPa^[5-9];

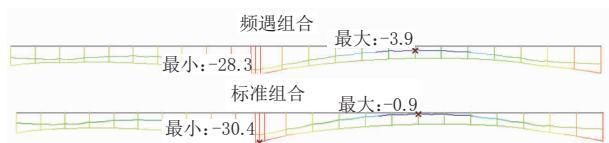


图9 UHPC主梁应力(单位:MPa)

活载变形如图10所示,活载竖向位移 $20\text{ mm}<L/600$,主梁刚度满足要求^[6]。地基反力如图11所示,标准组合下最大支反力为390.8 kPa,纵向框架间距1.5 m,换算地基反力为260.6 kN,小于持力层微风化粉砂岩天然状态抗压强度7 800 kPa,满足地基承载力要求。

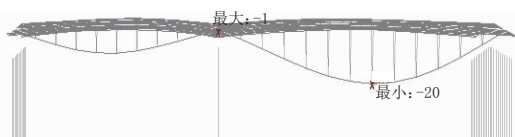


图10 活载竖向位移(单位:mm)

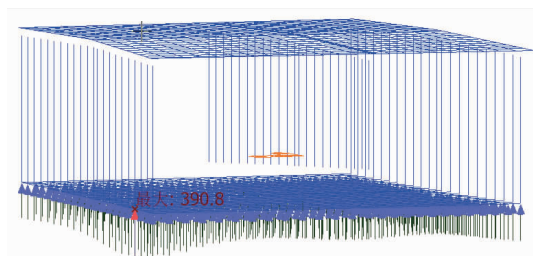


图11 地基反力(单位:kPa)

4.2 三维数值模型计算

MIDAS GTS三维有限元模型如图12所示,根据场地岩土工程勘察等资料,以邻近地铁1号线、地铁22号线及珠江隧道结构的涉铁范围为重点分析区域,确定分析模型的大小为(长×宽×高) $215\text{ m}\times 215\text{ m}\times 50\text{ m}$ 。考虑岩土体为半无限体,模型以外设定为固定边界。

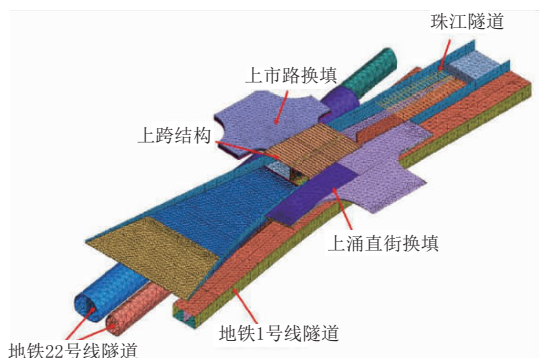


图12 拟建项目与地铁1、22号线及珠江隧道的关系图

白鹅潭大道(珠江隧道)工程施工对地铁1号线、22号线及珠江隧道结构的变形和受力产生了一定的

影响,但影响总体较小:地铁1号线隧道结构的最大水平位移为0.6 mm,最大竖向沉降量为4.4 mm;地铁22号线隧道结构的最大水平位移为0.003 mm,最大竖向沉降量为0.02 mm;珠江隧道结构的最大水平位移为3.4 mm,最大竖向沉降量为3.9 mm,满足规范要求。

白鹅潭大道(珠江隧道)工程对地铁1号线、地铁22号线隧道产生的附加荷载9.6 kPa,小于20 kPa,满足规范要求。施工期,抗浮安全系数 >1.3 ,满足规范要求。

5 结 语

通过研究隧道改造的结构体系方案、主梁断面、改造后结构的力学特征等方面,证明了采用UHPC结构进行隧道改造是合理可行的,为城市隧道改造提供技术借鉴。

(1)针对既有U形敞口段隧道改造,顶板采用连续结构体系方案,原结构受力状态不发生实质性改变,且在一定程度上改善既有侧墙受力。

(2)既有U形敞口段隧道净空受限,提出预制超薄UHPC-I梁加现浇桥面板方案,不但满足结构需求,且满足地基承载力及地铁附加应力要求。

(3)UHPC-I梁采用无筋梁有较大的安全储备,验证了无筋梁的适用性,造价节约约10%。

既有隧道敞口段U形断面改造采用UHPC-I梁加现浇层的结构形式,为今后城市道路与既有隧道U形槽交叉改造提供了可靠的参考和借鉴。未来,随着UHPC材料性能和工艺发展的提升,UHPC结构在复杂结构的快速建造、减小混凝土结构用钢指标、减小建筑高度以提高景观性、提升环保性能等方面有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王文东. 盾构隧道内部双层预制结构梁-柱节点连接技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(10): 208-211.
- [2] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 10-14, 80-95.
- [3] 贺耀北, 邵旭东, 龚斌, 等. 官新高速公路马路口资水大桥主梁方案比选[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 96-101.
- [4] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [5] 李立峰, 范昕, 石雄伟, 等. 大比例预应力UHPC-T形梁抗弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(5): 84-94.
- [6] 王法武, 石雪飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制研究[J]. 公路, 2006, 51(8): 72-76.
- [7] JTG/T D64-01—2015, 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [8] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [9] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].