

# 预制装配式超高性能混凝土(UHPC) 桥梁盖梁施工工艺研究

吴新印<sup>1</sup>, 胡方健<sup>2,3</sup>, 刘兆丰<sup>4</sup>

(1. 湖南中路华程桥梁科技股份有限公司, 湖南 湘潭 411100; 2. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125;  
3. 上海工业化装配化市政工程技术研究中心, 上海市 200125; 4. 湖南工程学院 建筑工程学院, 湖南 湘潭 411104)

**摘要:**为解决桥梁装配式施工中传统混凝土盖梁自重过大、整体吊装困难的难题,提出全预制装配式超高性能混凝土(UHPC)盖梁的设计方案。为研究 UHPC 盖梁的施工工艺,完成两根相似比为 1:2 的大比例 UHPC 盖梁共两次模型试验,获得 UHPC 材料配制、拌和及运输、构件模板制造及安装、UHPC 浇筑及振捣、UHPC 构件养护等过程的关键工艺参数,经过试制及检测,UHPC 盖梁制造成功,相关经验可为后续同类型工程及研究提供借鉴。

**关键词:**超高性能混凝土;桥梁盖梁;全预制装配式;施工工艺

桥梁墩台是桥梁结构的重要组成部分。在桥梁墩台中,盖梁作为一个将上部结构荷载传递给下部结构的重要构件,具有承上启下的作用<sup>[1-2]</sup>。盖梁的设计和施工对于一座桥梁具有重大意义。在城市桥梁建设中,为了充分利用城市空间、节约城市用地,同时也达到美观、视野开阔等目的,盖梁设计普遍采用大悬臂结构。

大悬臂普通混凝土预制盖梁在施工过程中遇到的问题绝大部分是由于自重过大直接导致或者间接导致的,如:运输及吊装重量大、现场张拉预应力费工费时。除此之外,普通混凝土盖梁还由于抗拉强度低,在车辆超载或其他荷载作用下,盖梁易出现裂缝。盖梁开裂后,水气、二氧化碳、氯离子等物质易侵入混凝土内部引起钢筋锈蚀,并导致混凝土进一步开裂,影响盖梁的承载力和耐久性。

采用超高性能混凝土(UHPC)材料的结构由于其自重小、强度高、耐久性强,在桥梁工程中具有非常好的推广利用前景。如能将 UHPC 材料应用于桥梁盖梁结构将是一种有意义的尝试。

该文基于将 UHPC 应用于桥梁结构中的若干研究及工程实例<sup>[3-5]</sup>,在文献[6]提出的一种全新的新型预制装配式 UHPC 桥梁盖梁设计方案基础上,有针对性地研究提出一套完整的 UHPC 盖梁施工方案。

根据调研,UHPC 新型盖梁的施工工艺少有资料

可以借鉴,有待深入研究,该文从室内模型工艺试验方面探讨这种新型盖梁的制作方法。

## 1 UHPC 盖梁构造

UHPC 盖梁为变截面大悬臂预应力 UHPC 结构,构造尺寸见图 1<sup>[6]</sup>。顶面设置 2%横坡,盖梁上部布置 11 个支座,支座处均设置了横隔板。UHPC 盖梁全长 24.6 m,两悬臂长均为 8.8 m;顶板最大宽度为 2.006 m;底板最大宽度为 2.2 m;两侧悬臂端部高 1.008 m,纯弯段跨中处梁高 2.1 m。顶板厚度均为 0.25 m;底板厚度标准段为 0.25 m,悬臂根部加厚段为 0.45 m;腹板厚度标准段为 0.2 m,悬臂根部加厚段为 0.32 m;桥墩柱中心距为 5.4 m,桥墩柱处为 1.6 m×1.6 m 方形截面。

此次试验制造的试件采用 1:2 相似比的缩尺模型,共计两个。

## 2 UHPC 力学指标

超高性能混凝土 UHPC 是一种高强度、高韧性、低孔隙率的超高强水泥基材料<sup>[7-11]</sup>。试验所用 UHPC 材料的主要力学指标设计值如表 1 所示。

收稿日期:2021-11-03(修改稿)

基金项目:湖南省科技重大专项(编号:2017SK1010);湖南省科技创新计划项目(编号:2018GK5025);上海市科技人才计划项目(编号:19QB1404800)

作者简介:吴新印,男,硕士,高级工程师, E-mail:50093457@qq.com

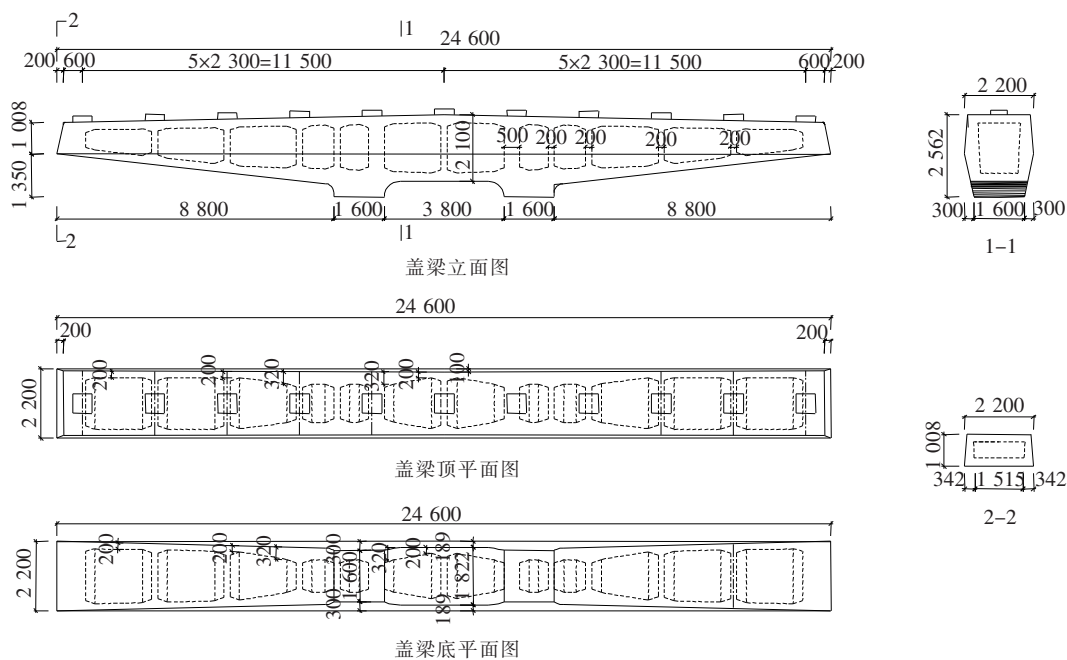


图 1 UHPC 盖梁构造(单位:mm)

表 1 UHPC 材料特性及主要力学性能

弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/(℃ <sup>-1</sup> )	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	抗压强度标准值/MPa	弹性抗拉强度标准值/MPa	抗拉极限强度标准值/MPa	抗压强度设计值/MPa	弹性抗拉强度设计值/MPa	抗拉极限强度设计值/MPa
5×10 <sup>4</sup>	0.2	0.000 01	27	120	7	7.7	52.57	4.31	4.74

3 UHPC 原材料

试验采用的 UHPC 原材料如下:

- (1) 水泥:52.5 级普通硅酸盐水泥。28 d 抗折强度为 9.91 MPa,抗压强度为 57.50 MPa。
- (2) 砂:标准砂,粒径范围为 0.25~0.65 mm。
- (3) 硅灰:灰白色粉末,无定性 SiO<sub>2</sub> 含量大于 90%,密度为 2.214 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为 20 m<sup>2</sup>/g,平均粒径为 0.1~0.2 μm。
- (4) 石英粉:325 目,密度为 2.626 g/cm<sup>3</sup>,平均粒径为 50 μm 左右。
- (5) 钢纤维:镀铜光面平直钢纤维,钢纤维掺量 2.5%。

4 施工工艺

4.1 预制场地及模板安装

此次 UHPC 盖梁制作场地为室内结构试验室,由

于试验室空间相对狭窄,且有试验仪器及其他模型堆放,施工过程需考虑场地的限制。试验梁模板的要求:① 采用钢模板,钢模板表面要设置加劲肋。钢模外面要方便附着式振动器的安装;② 模板安装应紧固,能够承受施工中的振捣荷载(平板振动器激振力约为 12 kN,振捣面积约为 1.2 m<sup>2</sup>);③ 内模应与外模连接牢固,需采用拉杆固定内模和外模位置,防止在浇筑过程中上浮(内模承受的上浮力约为 14 kN/m<sup>2</sup>)。钢筋绑扎照片见图 2。



图 2 钢筋绑扎

4.2 UHPC 搅拌

单个 UHPC 盖梁试件设计用量约为 6.61 m<sup>3</sup>,考

虑施工过程中的损耗,共生产  $8 \text{ m}^3$  UHPC。根据设计和施工要求,先拟定初始配合比,再试配,最后确定施工配合比,配合比已在施工前由湖南联智桥隧技术有限公司进行验证,结果符合设计要求。

UHPC 组分包括水泥、粉煤灰、石英砂、石英粉、钢纤维、减水剂和水等<sup>[12-13]</sup>。UHPC 现场搅拌采用 2 台高速智能搅拌机进行生产,生产能力为  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,UHPC 采用次搅拌完成,然后采用 1 台  $10 \text{ m}^3$  的混凝土搅拌车一次运输至施工地点。搅拌设备见图 3。



图 3 UHPC 搅拌设备

搅拌时间不少于  $6 \sim 8 \text{ min}$ ,拌和物流化后继续搅拌  $2 \text{ min}$ ,搅拌应均匀,不得有钢纤维结团现象。拌和物坍落度  $\geq 250 \text{ mm}$ ,扩展度  $\geq 560 \text{ mm}$ 。搅拌过程中,制作 2 组试块进行同条件养护。

#### 4.3 UHPC 运输

搅拌地点距试验室约  $34 \text{ km}$ ,为保证长距离运输的要求,UHPC 施工前,需进行凝结时间等试验,确定最佳配合比参数,确保 UHPC 的质量满足要求。为避免交通拥堵,确保凝结时间满足要求,在夜间施工。施工前,需熟悉运输路线,确保行车通畅。

#### 4.4 UHPC 浇筑

由于该项目在试验室内进行,采用一次浇筑成型,中间不设接缝。施工过程应保持浇筑连续<sup>[14-15]</sup>。受试验室场地限制,UHPC 浇筑应符合下列规定:

(1) 混凝土搅拌车运输至试验室,然后采用料斗接料,通过桁车运输至试验梁内。

(2) 卸料过程中应严格控制下料高度,一般不超过  $1 \text{ m}$ ;如超过  $1 \text{ m}$  需设置溜槽。

(3) UHPC 浇筑顺序为“先底板、再腹板、最后顶板,由中间向两端”。浇筑完底板及  $1/3$  腹板后,开启底部的附着式振动器,振捣密实后,再浇筑腹板及横隔板,开启腹板附着式振动器(根据需要可开启底板附着式振动器,但开启底板振动器后,腹板振动器也需开启,防止断层),每次的振捣时间约为  $30 \text{ s}$ 。浇筑完底板和腹板后,再浇筑顶板。顶板 UHPC 采用高频(振

捣频率  $\geq 100 \text{ Hz}$ )平板振动器振捣。浇筑振捣器布置方式见图 4、5。试验共制造两根缩尺盖梁试件,第 1 根采用料斗法浇筑,第 2 根采用泵送法浇筑。料斗法浇筑主要用于接料和运输均比较快的施工条件中,适合于工程量比较小的构件,卸料间隔时间控制在  $10 \text{ min}$  内;泵送法浇筑主要用于工程量比较大的大构件浇筑,便于保证浇筑的连续性。对于实际大量模型制作或现场实际构件浇筑时,采用泵送法浇筑较为合适。

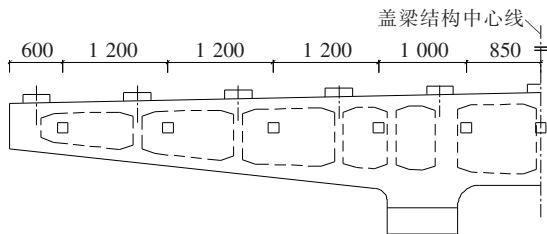


图 4 模板侧壁的附着式振捣器布置(单位:mm)

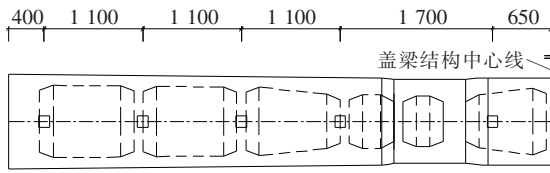


图 5 模板底部的附着式振捣器布置(单位:mm)

#### 4.5 UHPC 养护

##### 4.5.1 养护流程

UHPC 试验梁浇筑完成后,按下列要求养护:

(1) 静停。静停时的环境温度应在  $10^\circ\text{C}$  以上、相对湿度  $60\%$  以上,静停时间不应少于  $6 \text{ h}$ 。静停过程中要进行洒水养生,构件表面不得缺水。

(2) 蒸气养护。静停完毕后应及时进行蒸气养护。蒸气养护过程:以不大于  $10^\circ\text{C}/\text{h}$  的速度,升温至  $50^\circ\text{C}$  后,保持恒温不少于  $8 \text{ h}$ 。保证 UHPC 梁体内部受热均匀。再以不大于  $10^\circ\text{C}/\text{h}$  的速度,升温至  $80^\circ\text{C}$  后,保持恒温不少于  $72 \text{ h}$ 。以不超过  $12^\circ\text{C}/\text{h}$  的降温速度降至构件表面温度与环境温度之差不大于  $20^\circ\text{C}$  的温度范围。养护过程的环境相对湿度应保持在  $95\%$  以上。养护结束后可拆模。拆模时构件表面温度与环境温度之差不应大于  $20^\circ\text{C}$ 。

(3) 自然养护。超高性能混凝土构件终养结束后应进行自然养护,环境平均气温宜高于  $10^\circ\text{C}$ ,构件表面应保持湿润不少于  $7 \text{ d}$ 。覆盖节水保湿薄膜进行洒水养生。

4.5.2 蒸养设备安装

采用两台蒸养锅炉进行蒸气养护,蒸气采用蒸气管道进行输送。蒸养棚采用蒸养网片进行搭设,蒸养网片竖立于梁两侧,高 2 m,距梁模板约 10 cm,网片顶部沿梁纵向采用一排钢筋进行点焊连接。蒸养网片外覆盖双层保温棉被,要求铺至地面不少于 50 cm,周围进行压实,防止漏气。蒸养过程采用自动温度控制

系统,按养护流程对蒸养棚内温度实时控制。

4.6 外观、UHPC 强度检测结果

蒸气养护结束后,UHPC 盖梁颜色分布均匀,金属质感,表面平整,未见孔洞、蜂窝麻面、微裂缝,偶见少量零星气泡,现场试件 7 d 立方体抗压强度为 153.7 MPa,见表 2。

表 2 试件立方体抗压强度

制件日期	试压日期	龄期/ d	试件尺寸/mm			破坏荷 载/kN	单个试件 强度/MPa	测定值/ MPa	检验方法
			长	宽	高				
2018.06.04	2018.06.11	7	100	100	100	1 554.51	155.5	153.7	GB/T 50081—2002
			100	100	100	1 577.31	157.7		
			100	100	100	1 478.83	147.8		

5 结论

- (1) 研究了 UHPC 盖梁的制作工艺,获得了模板安装、UHPC 搅拌、运输、浇筑及养护过程中的相关工艺参数,最终成功制造了 UHPC 盖梁试件。
- (2) 经过 UHPC 盖梁外观检查及试块强度检测,均符合设计要求,该文采用的施工工艺切实可行。
- (3) 此次将 UHPC 应用于盖梁结构中是一次具有创新意义的尝试。相关经验可应用于同类型实际工程及研究。

参考文献:

[1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 5 版. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[2] 项海帆. 桥梁概念设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.

[3] 张哲,邵旭东,李文光,等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报,2015,28(8):50—58.

[4] 杜任远,黄卿维,陈宝春. 活性粉末混凝土桥梁应用与研究[J]. 世界桥梁,2013,41(1):69—74.

[5] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2002.

[6] 陈卫伟. 超高性能混凝土(UHPC)预制装配盖梁设计分

析[J]. 中国市政工程,2019,44(02):43—45.

[7] 黄卿维,沈秀将,陈宝春,等. 韩国超高性能混凝土桥梁研究与应用[J]. 中外公路,2016,36(2):222—225.

[8] Voo Y L, Tadros M K. Taking Ultra—High—Performance Concrete to New Heights the Malaysian Experience [J]. Magazine of Concrete Research,2016: 36—39.

[9] Andrade M C, Frias M, Aarup B. Durability of Ultra High Strength Concrete: Compact Reinforced Composite (CRC) [C]. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Utilization of High—Strength/High—Performance Concrete, Ed. ,de Larrard, F. and Lacroix, 1996.

[10] Blais P Y, Couture M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge—World’s First Reactive Powder Concrete Structure[J]. Pci Journal, 1999, 44(5): 60—71.

[11] Sparowitz L, Freytag B, Reichel M, et al. Wild Bridge—A Sustainable Arch Made of UHPFRC [C]. 3rd Chinese—Croatian Joint Colloquium, 2011.

[12] 魏琦. 轻质低收缩超高性能混凝土的制备与体积稳定性研究[D]. 安徽建筑大学硕士学位论文,2020.

[13] 陈珍玉. 钢桥面超高强韧性码(UHPC)的制备、施工及质量控制[J]. 福建建设科技,2020,35(02):75—77.

[14] 张贝贝,王明军,陈月娥,侯文轩,刘畅,修杨. 超高性能混凝土设计与制备[J]. 科学技术创新,2020,24(05): 114—115.

[15] 李金臻. 白色超高性能混凝土的制备与性能研究[D]. 南昌大学硕士学位论文,2019.