

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.01.057

超高性能混凝土在宁波机场路南延工程中的 规模化应用研究

金增选

(宁波市城市基础设施建设发展中心, 浙江 宁波 315040)

摘要: 宁波机场路南延工程采用超高性能混凝土作为小箱梁湿接缝, 钢筋免焊接, 且大幅减少现场浇筑混凝土的数量, 有效加快了施工进度, 保证了共建轨道交通宁奉线的按期通车时间, 并减少了施工对环境 and 交通的影响。开展了桥面板湿接缝的试验研究, 表明 V 形界面形式的抗裂性、承载力均优于凹槽界面和平面界面; 界面湿润、凿毛可显著提升超高性能混凝土和预制混凝土的界面结合性能。通过宁波机场路南延工程大量的应用研究, 形成超高性能混凝土预制拼装桥梁设计、施工、检测、验收成套技术要求体系, 进一步推动超高性能混凝土新技术的应用和发展。

关键词: 超高性能混凝土; 湿接缝; 小箱梁; 预制拼装; 界面处理

中图分类号: U444

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0234-05

1 概述

发展建筑工业化是推进绿色建造的有效方式。采用工厂化生产建筑构件, 具有进度可控、质量可控、成本可控等优势^[1]。装配化是桥梁工业化的主要特征, 也是我国建设领域转型升级与战略产业发展方向^[2]。装配化桥梁的预制构件在工厂制作, 运至现场起吊安装就位后, 通过接头构造连接。湿接缝作为一种重要的连接形式, 其性能对装配化桥梁结构的安全性和耐久性至关重要。

超高性能混凝土(下文简称 UHPC)是由水泥、矿物掺合料、骨料、纤维、外加剂和水等原材料制成的具有高强、高韧、高耐久性的纤维增强水泥基复合材料。UHPC 和钢筋之间的握裹性好, 粘结强度高, 大幅减小钢筋搭接连接的长度; 同时具有良好的流动性, 在免振捣的情况下能实现自密实, 方便现场施工。以上优点, 使得 UHPC 在预制拼装结构的现场湿接缝应用方面具有很好的发展前景。目前美国和加拿大 UHPC 最主要的应用为快速桥梁施工(ABC), 即用于装配式桥梁预制构件的湿接缝连接^[3]。湖南大学对普通混凝土预制板、UHPC 作为湿接缝的结构进行了有限元和试验研究, 表明在纯弯段普通混凝土处首先开裂且最终在纯弯段内普通混凝土处破坏^[4], 湖南大学进一步对桥面板湿接缝进行了等高平口接

缝和局部加高接缝的试验研究^[5]。

宁波机场路南延工程的桥梁为公铁一体化双层高架结构, 全线标准段小箱梁和部分预制拼装桥墩采用 UHPC 作为湿接缝材料。该工程于 2017 年开始施工, 2019 年主体结构施工完成, 在设计施工过程中, 国内尚无关于 UHPC 设计、施工技术标准和验收标准。因此, 作为 UHPC 新技术在国内规模化应用的工程, 重点开展了小箱梁湿接缝结构试验、UHPC 施工和质量验收标准等方面的应用研究, 为 UHPC 新技术的进一步应用和发展积累工程经验。

2 工程概况

宁波机场快速路南延工程是宁波市中心城区快速路网的重要组成部分, 机场快速路南延工程北起鄞州大道, 南至奉化岳林东路, 全长约 18.8 km, 线位见图 1。采用主线高架 + 地面道路的形式, 其中 11.8 km 为机场快速路与城际铁路一体化合建高架桥。主线高架和地面辅道均为双向 6 车道规模。单层高架断面见图 2, 共建段双层高架断面见图 3。

机场快速路与轨道交通宁奉线共建, 根据宁奉线的建设计划, 在开工后一年半内要完成土建主体结构施工, 此外, 现状地面道路的车辆交通量大, 以上两方面的因素, 均要求提高预制装配率, 并加快现场装配施工速度。

快速路标准段上部结构采用简支变连续小箱梁、跨路口等节点处采用钢—混凝土组合梁, 快速路层的上部结构 100% 采用预制装配结构。其中小箱梁跨径

收稿日期: 2022-10-28

作者简介: 金增选(1988—), 男, 学士, 高级工程师, 从事工程项目建设管理工作。



图1 宁波机场路南延工程线位示意图

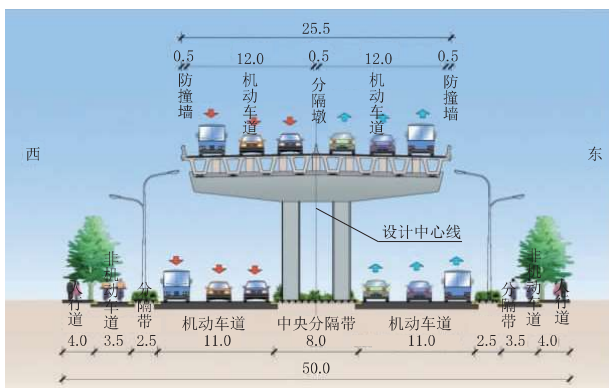


图2 单层高架断面图(单位:m)

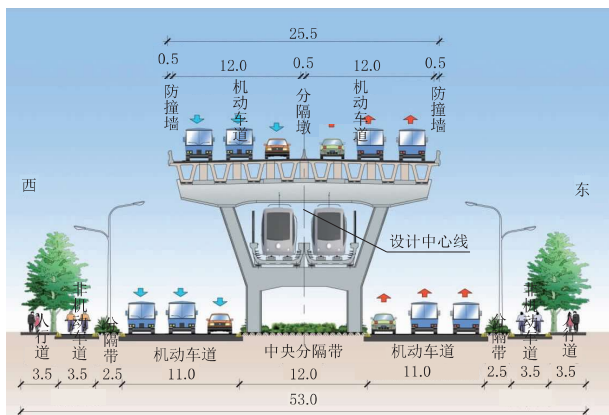


图3 2共建段双层高架断面图(单位:m)

以30~35 m为主,最大跨径40 m。全线标准段小箱梁为采用UHPC湿接缝,总长约10 km。

小箱梁横向湿接缝采用超高性能混凝土,钢筋免焊接,且湿接缝宽度小,大幅减少现场浇筑混凝土的数量,可有效提高施工速度。

3 UHPC 应用研究

3.1 UHPC 新技术应用的质量控制对策

在宁波机场路南延工程实施之前,UHPC湿接缝已在部分工程中应用,包括上海S3公路3 km长的小箱梁湿接缝、上海嘉闵高架桥墩预制拼装试验段、上海南浦大桥匝道改建等。

在本工程设计施工过程中,UHPC材料在国内处于应用推广阶段,各厂家的UHPC产品性能有差异、施工质量参差不齐,国内尚无关于UHPC设计、施工技术标准和验收标准。针对以上情况,为保证工程质量,重点采取了以下应用对策:

- (1)UHPC材料配合比检验。
- (2)湿接缝的结构试验研究。
- (3)研究制定UHPC施工和质量验收标准;加强施工过程的质量管理监督。

以上对策中,UHPC的材料配合比检验,目的是严格筛选UHPC性能指标符合要求的产品。对参加检测的产品共进行了三轮检测,其中三家产品的各项指标均符合要求。

本文重点介绍湿接缝的试验研究、施工和质量验收标准的相关内容。

3.2 UHPC 湿接缝连接技术及试验研究

3.2.1 UHPC 湿接缝性能特点

UHPC细小颗粒混合料的均匀性高,小直径短纤维空间连接弥合微裂纹,因此,具有高强度,高致密的特点。与钢筋之间的握裹能力强抗压强度可达120~180 MPa,抗拉强度可达6~10 MPa。防腐性能和耐久性能好。

在预制结构现场安装的湿接缝中采用UHPC时,其主要优点体现在以下几个方面:

- (1)采用普通混凝土施工工艺,无需蒸养,常规养护;
- (2)流动性好,易于施工,可以免振捣;
- (3)利用UHPC优异的抗拉性能和握裹能力,减少钢筋锚固长度(不小于5 d);
- (4)钢筋定位难度远低于焊接方式;
- (5)钢筋不焊接,取消常规大量现场钢筋焊接,缩短工期,降低施工难度。

3.2.2 小箱梁UHPC湿接缝构造

小箱梁钢筋湿接缝宽250 mm,断面见图4。相邻两片梁的横向预留钢筋平面上交错布置,直接与UHPC锚固传力,钢筋不需要焊接连接。UHPC湿接

缝钢筋断面见图 5,钢筋布置平面见图 6。

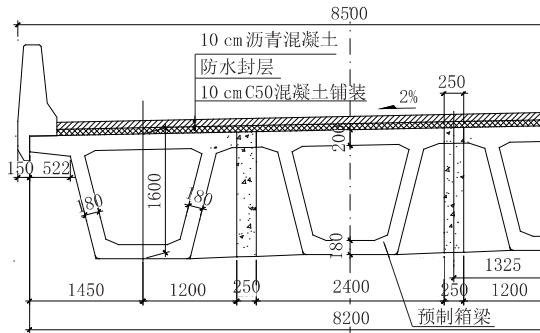


图 4 小箱梁 UHPC 横向湿接缝断面图(单位:cm)

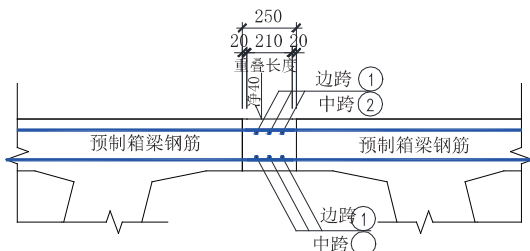


图 5 UHPC 湿接缝钢筋断面图(单位:cm)

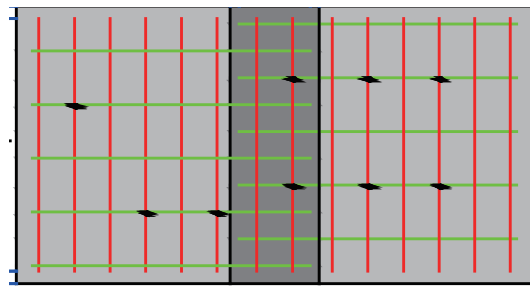


图 6 UHPC 湿接缝钢筋布置平面

3.2.3 桥面板 UHPC 连接试验

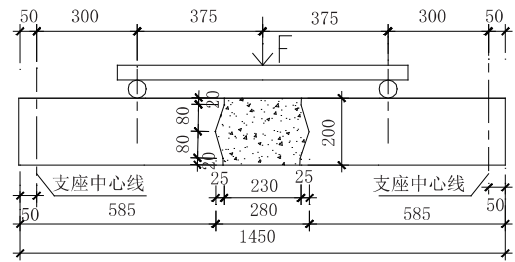
对各项指标符合要求的三种 UHPC 产品(以下以分别以 A1、A2、A3 作为三个产品代号),进一步进行湿接缝的构件模型试验。按照工程实际的桥面板湿接缝尺寸,进行桥面板接缝的静力试验和工艺试验,验证桥面板 UHPC 湿接缝的静力受力性能;试验接触面不同处理工艺下,桥面板 UHPC 湿接缝静力受力性能,以指导现场施工。

(1) 试验模型

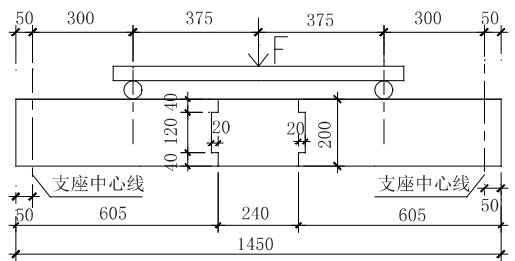
采用足尺构件,湿接缝设企口缝、V 型缝和直缝三种接缝形式,见图 7。缝宽 230~280 mm,平均缝宽 250 mm。各板件尺寸、配筋相同,区别仅在于接缝界面形式。接缝界面形式见图 7。

单侧钢筋 $\Phi 12@100$,相邻两桥面板在湿接缝位置的钢筋交错布置,钢筋间距 $@50$ mm,不焊接。桥面板采用 UHPC 连接,预制段为 C50 混凝土,测试其抗弯承载力。

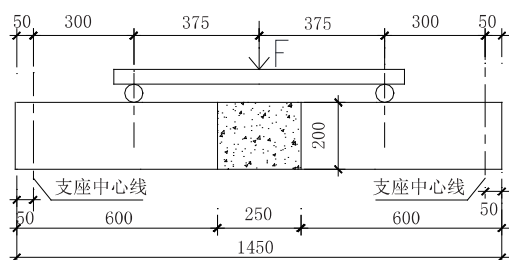
试件尺寸为 1.45 m(长) \times 0.775 m(宽) \times 0.2 m(高)。



(a) 企口缝



(b) 凹槽缝



(c) 平缝

图 7 预制混凝土界面处理形式(单位:mm)

三种 UHPC 材料分别进行三种接缝形式试验,共计制作 9 个试件。同时,试件湿接缝界面进行凿毛和湿润的对比,具体试件参数见表 1。

表 1 试件参数表

| 编号 | UHPC 材料 | 接缝界面形式 | 两侧表面凿毛情况 | 两侧表面湿润情况 |
|-----|---------|--------|----------|----------|
| B-1 | A1 | V 形 | 深凿 / 深凿 | 干燥 / 湿润 |
| B-2 | A1 | 凹槽 | 深凿 / 浅凿 | 干燥 / 干燥 |
| B-3 | A1 | 平面 | 浅凿 / 未凿 | 湿润 / 湿润 |
| B-4 | A2 | V 形 | 深凿 / 深凿 | 干燥 / 湿润 |
| B-5 | A2 | 凹槽 | 深凿 / 浅凿 | 干燥 / 干燥 |
| B-6 | A2 | 平面 | 浅凿 / 未凿 | 湿润 / 湿润 |
| B-7 | A3 | V 形 | 深凿 / 深凿 | 干燥 / 湿润 |
| B-8 | A3 | 凹槽 | 深凿 / 浅凿 | 干燥 / 干燥 |
| B-9 | A3 | 平面 | 浅凿 / 未凿 | 湿润 / 湿润 |

试件制作照片见图 8。



(a) V 形 (b) 凹槽 (c) 平面

图 8 预制混凝土界面照片

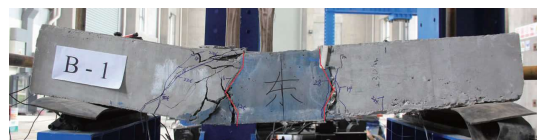
(2) 试验加载

分级加载, 每级 20 kN, 加载速率保持在 1 min 加到预定荷载, 持荷 5 min, 确保裂缝及变形能够充分开展, 加载至 40~80 kN, 持荷观察可能混凝土裂缝发展情况。

开裂后改变加载速率进行加载, 每级荷载 30 kN。

(3) 试验结果

因篇幅所限, 列出部分试件的破坏情况照片, 见图 9。



(a) B-1 试件(V形界面, A1UHPC 材料)



(b) B-5 试件(凹槽界面, A2UHPC 材料)



(c) B-9 试件(平面界面, A3UHPC 材料)

图 9 试验最终破坏现场照片

以试件 B-1 为例, 说明试验破坏过程情况。在 100 kN 的时候在普通混凝土上出现裂缝, 该裂缝接近 UHPC 结合面; 120 kN 时 UHPC 与普通混凝土交接面位置开裂, 180 kN 时混凝土表面的裂缝宽度达到 0.4 mm, 220 kN 时混凝土表面裂缝宽度为 0.6 mm, UHPC 粘结面上宽度为 0.4 mm, 360 kN 时东侧加载点至粘结面位置出现斜向裂缝, 480 kN 时受压区普通混凝土位置 / 靠近 UHPC 的部位, 混凝土出现少量压碎的情况, 540 kN 粘结面位置混凝土压碎。表面干燥面的破坏比湿润面更为严重。

其余各块板的破坏过程基本相似, 试验荷载及破坏情况见表 2。

试验主要结论如下:

a. UHPC 湿接缝性能: 普通混凝土最先出现开裂, 然后是 UHPC 与普通混凝土粘结面出现裂缝, UHPC 范围内未出现裂缝。

b. 试验结果表明, UHPC 湿接缝的承载力不低于预制段 C50 混凝土, 采用 UHPC 作为预制构件的湿接缝连接材料, 可满足结构受力要求。

c. 本工程拟采用的三家 UHPC 产品性能, 均可满足使用要求。

表 2 试验荷载及破坏情况表

| 编号 | 开裂荷载 /kN | | 屈服荷载 /kN | 极限荷载 /kN | 破坏较严重面 |
|-----|----------|-----|----------|----------|--------|
| | 普通混凝土 | 粘结面 | | | |
| B-1 | 100 | 120 | 420 | 540 | 干燥面 |
| B-2 | 60 | 100 | 320 | 467 | 凿毛面 |
| B-3 | 50 | 80k | 360 | 513 | 未凿面 |
| B-4 | 60 | 110 | 440 | 600 | 干燥面 |
| B-5 | 90 | — | 360 | 507 | 凿毛面 |
| B-6 | 90 | 120 | 340 | 518 | 未凿面 |
| B-7 | 50 | 110 | 440 | 586 | 干燥面 |
| B-8 | 60 | 130 | 360 | 539 | 凿毛面 |
| B-9 | 60 | 110 | 380 | 525 | 未凿面 |

d. 三种界面形式对比: 对同一个厂家的 UHPC 材料, 从开裂荷载来看, V 形界面 > 凹槽界面 > 平面界面; 试件承载力方面, V 形界面明显高于凹槽界面和平面界面, 性能最优, 凹槽界面和平面界面承载力相近。

e. 表面干燥与湿润对比: B1、B4、B7 两侧进行了表面干燥与湿润对比, 干燥面破坏均比湿润面严重, 说明湿润面可使 UHPC 和预制混凝土结合更好。

f. 经表面凿毛对比, 三家材料均有比较一致的结论: 凹槽界面的凿毛面破坏更严重, 对于平面界面, 未凿面的破坏更严重。一般情况下, 凿毛面的结合应该更好, 但本次试验凹槽界面的凿毛面破坏更严重, 可能与凹槽口尺寸只有 2 cm, 表面凿毛影响槽口折角区的混凝土完整性有关。

3.3 UHPC 施工和质量验收要求

为规范现场施工, 保证工程质量, 建设单位、设计、施工、监理, 在以往工程应用经验的基础上, 结合本工程 UHPC 配合比试验、湿接缝板试验以及现场实际情况, 经深入研究, 制定相关技术要求, 包括《UHPC 施工操作技术手册》、《湿接缝施工阶段 UHPC 检测要求》。

《UHPC 施工操作技术手册》中, 对各施工步骤均作了明确的规定, 包括施工前准备、搅拌、拌合物运输、浇筑、养护等。

《湿接缝施工阶段 UHPC 检测要求》中, 明确规定 UHPC 第三方抽检的取样、检测指标、合格判定等要求。

在施工过程中, 严格按照技术要求执行, 加强质量管理监督。

本工程于 2019 年完成主体结构施工, 2020 年通车, UHPC 湿接缝使用状况良好。

4 结 语

宁波机场路南延工程采用 UHPC 作为小箱梁湿接

缝,钢筋免焊接,且大幅减少现场浇筑混凝土的数量,有效加快了施工速度,保证了共建的轨道交通宁奉线按期通车,并减少了施工对环境和交通的影响。

工程在小箱梁湿接缝结构试验、UHPC 施工和质量验收标准等方面进行了应用研究,主要结论如下:

(1)混凝土预制段裂缝先于界面接缝,UHPC 范围内未出现裂缝。表明 UHPC 湿接缝的抗裂性和承载力不低于预制段混凝土,采用 UHPC 作为预制构件的湿接缝连接材料,可满足结构受力要求。

(2)V 形界面形式抗裂性、承载力均最优。

(3)界面湿润、凿毛可使 UHPC 和预制混凝土的界面结合更好。

(4)依托宁波机场路南延工程大量的应用研究,

形成 UHPC 预制拼装桥梁设计、施工、检测、验收成套技术要求体系,进一步推动 UHPC 新技术的应用和发展。

参考文献:

[1] 毛志兵,于震平.关于推进我国绿色建筑发展若干问题的思考[J].施工技术,2014(1):14-16.

[2] 国务院办公厅.国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[J].住宅产业,2016(10):24-26.

[3] 中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 分会.2019 年度中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J].混凝土世界,2020(2):30-43.

[4] 张阳,陈贝.预制 NC 板现浇 UHPC 接缝的抗弯性能有限元分析研究[J].公路工程,2018(12):1-5,51.

[5] 陈艳良,邵旭东.UHPC 桥面板现浇接缝的弯拉性能研究[J].公路工程,2020(10):123-128.



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com