

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.06.043

UHPC 薄壁盖梁设计、结构试验及施工技术研究

胡方健^{1,2}

[1.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125; 2.上海工业化装配化市政工程技术研究中心,上海市 200125]

摘 要: 预制桥梁中盖梁重量较大的问题一直困扰着施工,具有轻质高强特点的 UHPC 可为盖梁轻量化提供解决方案。设计三种采用 UHPC 的薄壁盖梁,对比断面形式、材料指标及预应力体系;分批次开展结构试验,测试不同缩尺比下的全过程受力状态,分析构件抗裂性、承载力和变形等;比较不同 UHPC 材料、模板、振捣和养护方法对试件质量的影响。经过研究,UHPC 薄壁盖梁设计方案可减轻原结构重量 40%以上;UHPC 盖梁受力可靠、抗裂性好、变形能力强;UHPC 构件生产需严控浇筑过程。

关键词: UHPC; 盖梁; 设计; 试验; 施工

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)06-0163-04

1 概 述

在基础设施领域,装配式结构是我国近期的战略发展方向,也是重要的新兴产业。在桥梁工程中,装配式主梁已在公路和城市桥梁中有大量应用,但装配式下部结构一直是应用难点。上海从 2012 年起开始了干接法装配式下部结构(立柱和盖梁)的研究和应用,并取得了较好的效果。但在应用上述技术的过程中发现一些问题,较为突出的是盖梁自重偏大(可达 200~300 t),这给运输和安装带来较大困难。针对上述问题,上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司开展相关研究,提出盖梁轻型化方案^[1-2],对高强材料,如 C80 以上混凝土、超高性能混凝土(以下简称“UHPC”)应用至整体式盖梁中的可行性进行了探索。本文主要介绍 UHPC 盖梁的一些研究成果。

UHPC 材料作为近年来正在推广的一种新材料,具有超高抗压强度、较高抗拉强度、良好拉伸应变、超致密性和耐久性等特点。UHPC 应用至盖梁的思路为:利用 UHPC 良好性能,将原使用 C50 混凝土的盖梁形体挖空成薄壁构件,在满足承受上部荷载和自重的前提下,最大限度地减轻自身重量。本课题组成员^[3]研究了口形断面 UHPC 整体式盖梁设计方案。本课题组联合湖南大学^[4-5]等对口形断面 UHPC 整体式盖梁进行了 1:2 缩尺盖梁试验研究,

掌握了此类盖梁的受力特点。在此基础上,本课题组又开展了 π 形断面整体式盖梁和分层组合口形断面盖梁的设计方案研究和试验^[2],更进一步完善了薄壁 UHPC 盖梁的研究成果。

本文结合课题组研究成果^[1-2]主要介绍 UHPC 盖梁设计方法、UHPC 盖梁结构试验、UHPC 盖梁施工技术。

2 设计方案

2.1 断面设计

课题组在同种外荷载下为整体预制 UHPC 盖梁提出整浇口形断面、整浇 π 形断面、分层浇筑口形断面三种断面(见图 1),并完成相关设计和缩尺静载试验^[3-5]。设计指标见表 1。结构受力满足规范要求,试验结果符合预期。

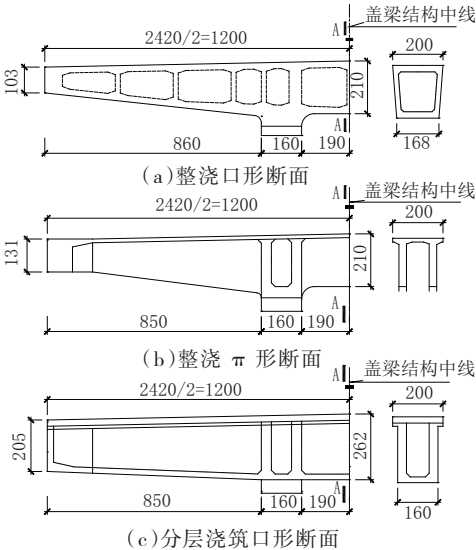


图 1 整体预制 UHPC(组合)盖梁设计方案(1/2,单位:cm)

收稿日期: 2021-08-27

基金项目: 上海市科技人才计划项目(19QB1404800)

作者简介: 胡方健(1984—),男,博士,高级工程师,主要从事桥梁设计及研究工作。

表 1 整体预制 UHPC(组合)盖梁综合比较

比较项	口形断面	口形断面	π 形断面	分层口形断面
结构受力	B	A	A	A
UHPC/m ³	56.8	59.1	49.4	45.6
普通混凝土 /m ³	—	—	—	12.0
钢绞线 /kg	2034	4041	1538	3942
普通钢筋 /t	22.3	10.8	1.10	3.97
整体减重率 /%	43	41	50	42
施工便利性	较难	较难	较简单	较简单
制造时间 /d	6	6	6	9
整体重量 /t	148	154	128	150

注:A 指按设计标准部分预应力频遇组合不受拉;B 指按部分预应力允许开裂。

整浇口形断面的工作性能最好,体现在盖梁的承压区面积大、抗弯和抗扭惯性矩很大。此外,预应力配置量相对较小,结构减重率适中(43%)。但是从施工角度来看,该方案采取措施偏多且具有一定风险:需设置不取出的刚性内模和强大的抗浮限位,内模偏位不易控制且后果较严重。内模的横向偏位会影响内侧保护层厚度和 UHPC 密实性,进而影响结构受力性能。内模上浮量大,则会导致构件报废。在预制技术条件不好时,应避免采用整体浇筑口形断面。

π 形断面的构造减重率最高(50%),结构抗剪能力接近整浇口形断面。由于腹板底缘承压区小,抗弯能力稍弱。截面是开口形状,因而抗扭能力与闭口断面相差较多。结构整体在弯、剪、扭相关作用下的极限状态可能发生脆性破坏,故设计时应对抗剪、扭承载力适当留有余量。从施工角度来看,π 形断面在三种方案中施工最简单、风险最小。该种断面适用于结构受力明确、扭矩较小且对结构重量有较大限制的情况。

分层浇筑口形断面的材料成本最低。结构各类承载力和刚度与整浇口形断面略接近,试验中的破坏状态体现为延性。UHPC 材料约为口形断面 80%、π 形断面 92%,但由于同时存在 UHPC 和普通混凝土,故结构重量并不占优(减重率 42%)。从施工角度来看,采用的技术与 π 形断面接近且风险较小、结构刚度大且可按一次张拉出厂。但由于需先整体浇筑 U 形 UHPC 底槽后再浇筑普通混凝土顶板,所以预制施工时间比其他两种类型要多 3 d 以上,稍显麻烦。

2.2 预应力体系设计

2.2.1 设计标准

结合 UHPC 材料特性提出两种设计思路:(1)利用 UHPC 抗拉强度和应力强化段的拉伸应变能力,

在频遇组合下,裂缝宽度不超过 0.05 mm。(2)利用 UHPC 抗压强度,在标准值组合下,截面不出现拉应力、压应力不超过抗压强度标准值 50%。

选择口形断面盖梁分别按第 1、2 种体系设计(见图 1),盖梁承载力和应力均能满足要求。在盖梁外形不变的前提下,对预应力钢绞线、普通钢筋和应力状态进行比较。第 1 种体系材料指标为:UHPC 用量 56.8 m³,钢绞线 2 034 kg,钢筋 22.3 t;第 2 种体系的 UHPC 用量 59.1 m³,钢绞线 4 041 kg,钢筋 10.8 t。第 1 种体系的经济性较好,相对第 2 种体系的总价格差异约在 10%以内。课题组按第 1 种体系设计了缩尺试件,委托湖南大学进行 2 组试验(抗弯、抗剪),UHPC 由中路华程供应。在第 1 个试件制造时,UHPC 按常规标准配置。由于试件顶层钢筋配置太多,UHPC 浇筑受到一定影响,现场采用人工清理形式确保浇筑密实。在第 2 个试件制造时,采取 UHPC 缓凝和泵送措施,回避了试件顶层钢筋的不利影响。从试验结果来看,试件承载力和其他性能满足要求。根据试件制造经验,UHPC 结构的普通钢筋,尤其是顶缘水平向钢筋不宜配置太多。

2.2.2 张拉批次

按照常规设计思路,大悬臂盖梁的设计以运营状态为目标设计构件尺寸和配置预应力,并需复核各施工阶段状态满足受力要求。由于盖梁所受到的上部结构荷载远大于盖梁自重,设计时为避免盖梁下缘受拉而将盖梁预应力作分批张拉,通常是在盖梁浇筑完成时张拉第一批,主梁安装完成后张拉第二批。按以上方式设计出的盖梁将是构件尺寸最小、预应力材料用量最少的方案。

对于整体预制的 UHPC 盖梁,如果按以上采用分批张拉预应力的方案,就不能充分发挥装配式 UHPC 结构的价值。这是因为盖梁在现场安装完成之后还需张拉一批预应力及完成相关措施,不仅增加施工投入,还耗费现场时间。

对于现场施工时间紧张的城市桥梁工程来说,分批张拉预应力的盖梁并不合理,最理想的状态是当盖梁安装后,在最短的时间内安装上部结构。按照这种需求,项目组设计了适用于桥宽 25 m 的按一次张拉的整体预制盖梁方案(见图 1 中的分层口形断面方案),悬臂根部梁高增加 25%,总材料成本变化约在 1%以内,重量增加 17%至 150 t,单根盖梁的现场施工时间可减少 3 d 以上,从社会效益和经济效益进行综合评价是相对合理的。

2.2.3 预应力类型

UHPC 盖梁相对普通混凝土盖梁减重的关键在于采用薄壁式构造。如 UHPC 盖梁仍然采用普通混凝土结构常用的预埋管道后再灌浆的预应力体系,由于 UHPC 对保护层和体内流动净距控制严格,构件尺寸难以缩减,结构经济性较差。本课题组提出在工程设计中采用缓黏结钢绞线的方案,在试验中选择无黏结钢绞线替代(模拟前期性能)。

分别以采用灌浆体系、缓黏结体系的 UHPC 梁设计算例(见图 2)。梁体断面高 1 000 mm,保护层厚 20 mm,体内构造物并置净距 30 mm,竖向箍筋直径 16 mm(竖向布 2 根)。(1)灌浆体系。预应力 4 束 8-15.2 钢绞线,金属波纹管外直径 85 mm(水平 1 根、竖向 4 根),可得腹板最小厚度 170 mm(按波纹管外直径一半控制保护层厚度),最小净厚度 85 mm,毛截面 0.17 m²,净截面 0.15 m²,平均预应力 41.4 MPa。(2)缓黏结体系。预应力 8 根 $\phi 28.6$ mm 缓黏结钢绞线(单根截面 532 mm²),护套外直径 38 mm(水平 1 根、竖向 8 根),可得腹板最小厚度 110 mm,最小净厚度 72 mm,毛截面 0.11 m²,净截面 0.10 m²,平均预应力 59.3 MPa。方案 1 与方案 2 的预加力比为 1.04,净截面比为 1.5,预应力比 0.70。可见,在同等预加力吨位和外荷载前提下,缓黏结体系可减薄构件,降低 UHPC 用量,提高预应力度,有充分竞争力。缓黏结体系在国内已有少量应用,待产品进一步成熟后,完全可以在 UHPC 结构中推广。

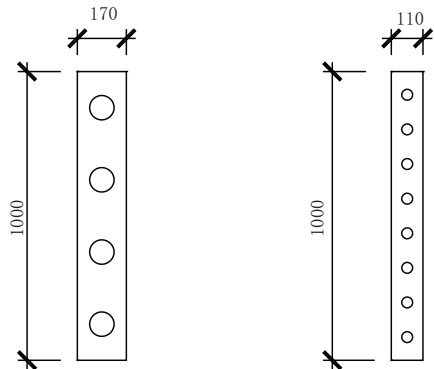


图 2 UHPC 使用不同预应力体系的比较(单位:mm)

3 试验研究

针对通行双向 6 车道市政桥梁(总宽 25 m)盖梁的缩尺试件,设计缩尺比 1:2 的口形整体浇筑断面 UHPC 盖梁(见图 3)进行了大剪跨比(抗弯)、小剪跨比(抗剪)工况测试^[1,4,5],缩尺试件最大加载竖向力 320 t(试件未破坏),对应原型盖梁抗剪承载力参考值 12 800 kN、抗剪承载力计算值 11 904 kN,剪力设

计值 9 472 kN;抗弯承载力计算值 51 723 kN·m,弯矩设计值 39 044 kN·m;在端部加载竖向力 265 t 时的最大竖向位移约 140 mm($L/61$)。由于该试件在受拉区配置较多普通钢筋,故弯曲变形能力较强。

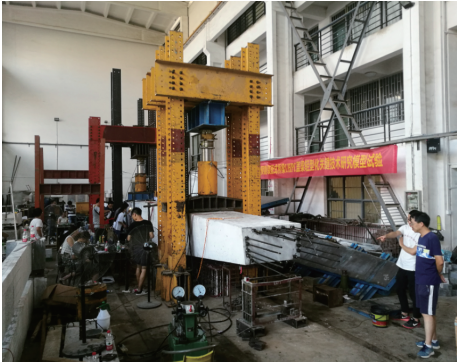


图 3 口形整体浇筑断面 UHPC 盖梁抗剪试验

设计缩尺比 1:2.5 的 π 形和口形分层浇筑断面 UHPC 盖梁(见图 4、图 5)做了大、中、小剪跨比及弯剪扭耦合等工况测试^[2]。缩尺试件最大加载竖向力约 443 t,对应原型盖梁抗剪承载力极限值 27 605 kN、抗剪承载力计算值 17 274 kN,剪力设计值 11 023 kN;最大加载产生弯矩对应原型盖梁抗弯承载力极限值 67 421 kN·m,抗弯承载力计算值 47 016 kN·m,弯矩设计值 38 831 kN·m; π 形断面盖梁试件在端部加载竖向力 115 t 时的最大竖向位移约 100 mm($L/85$),口形分层浇筑断面盖梁试件在端部加载竖向力 147 t 时的最大竖向位移约 90 mm($L/94$)。由于这两类试件在受拉区不配置普通钢筋,故极限弯曲变形能力相对前一种较弱。



图 4 π 形整体浇筑断面 UHPC 盖梁试验



图 5 口形分层浇筑断面 UHPC 盖梁试验

试验中,UHPC 盖梁的各种承载力基本符合预期,并展现了良好的抗裂性和变形能力。竖向配筋量较少的 UHPC 试件,其抗剪破坏体现出脆性破坏形态。这对设计的启示是:在设计 UHPC 大悬臂盖梁承载力时,应使盖梁破坏发生在根部,并应将根部破坏状态设计为受弯控制,且有一定延性。

4 施工技术研究

课题组共制造了 2 个 1:2 缩尺盖梁模型(长约 12.1 m、UHPC 约 6.61 m³)、7 个 1:2.5 缩尺盖梁模型(长约 9.6 m、UHPC 约 2.92~3.16 m³),在试件施工过程中积累了一定经验。

4.1 UHPC 的工作性能

对 UHPC 需重点关注浇筑时的工作性能,主要指浇筑时的流动性和密实性。当常规 UHPC 材料应用于体积较大的构件时,由于拌合机方量有限,需多次拌合,可采用两台拌合机接替、错开出料时间实现连续浇筑,也可采用多台罐车临时存储(自转动不停)再分次下料实现连续浇筑。如 UHPC 经过特殊配置具有较长时间(>1 h)静停后的流动性,在安排分批浇筑时则可间隔较长时间。项目组在试验中先后采用了中路华程、江苏苏博特、上海复培、浙江宏日泰耐克和中路杜拉的 UHPC,相关材料均为针对设计要求配置。

4.2 模板

课题组在试件制造根据构件表面所处位置,有区别地使用了钢模板和木模板并对比构件的表观质量。在制造口形断面盖梁时,侧模和底模为钢模,内模为木模。 π 形断面盖梁侧模为钢模,内模为木模。分层浇筑口形断面盖梁全部使用木模。

课题组比较了使用钢模板露天制造试件的表观质量。部分试件制造时天气晴朗,脱模后表观质量明显较好(见图 6)。钢模板沾水后(其中一个为小雨后浇筑,另一个为晴天浇筑前喷高压水清洁表面),相关试件的表观质量均较差(见图 7)。课题组认为,UHPC 构件宜在厂房内制造且在合模浇筑前需保持钢模板表面干燥。比较使用钢模板与木模板(见图 8)的表观质量发现,后者明显优于前者:表面光滑,基本没有气泡。在工程中通常以钢模板为主,浇筑前应慎重处理其表面。

4.3 振捣

UHPC 在浇筑时需要适当的振捣,目的是提高密实性,减少构件表面气泡。课题组在试件制造时,针



图 6 使用钢模板的试件表面(模板干燥)



图 7 使用钢模板的试件表面(模板沾水)



图 8 使用木模板的试件表面

对钢模板和木模板采用了与之匹配的振捣方法。在使用钢模板时,需预留基座安装附着式高频振捣器,在浇筑时隔一定时间开启并持续 30 s 左右。时间不宜太长,否则钢纤维易离析。针对木模板,则需采用常规振动棒,不宜采用附着式振捣器(木模板易解体),可将振动棒端头顶住木模板外侧面做短时间激振。

4.4 养护

UHPC 可采用蒸汽养护和自然养护。这对结构受力的影响主要体现为徐变系数取值不同。从课题组的使用经验来看,可根据工作性要求、材料配比、构件类型分别使用不同的养护方法。如构件体量大、连续浇筑时间较长,宜采用降低水用量并适当增加减

(下转第 192 页)



图6 区域路网分流示意图

误有所增加,但路网整体运行稳定,施工过程中应注意加强动态交通管理。

6 结 语

本文统筹考虑建设条件,路网交通运行状况,对施工进度的影响,工程经济性等多方面因素,以安全、适用、经济为原则,对保通道路的建设规模和工程技术标准的制定、交通组织方案及评价等进行了分析,对指导高速公路入城段改扩建工程的保通方案制定具有一定借鉴意义。

参考文献:

- [1] 上海市人民政府.上海市城市总体规划(2017—2035)[R].上海:上海市人民政府,2018.
- [2] 上海市城乡建设和交通发展研究院,上海城市综合交通规划研究所.2021年上海市综合交通年度报告[R].上海:上海市交通委员会,2021.
- [3] JTG D60—2004,山东省涉路工程技术规范[S].
- [4] 刘庆元,姚霏,赵迪,等.高速公路改扩建工程保通施工交通组织研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019(6):43-46.
- [5] 王剑.区域高速公路改扩建模式及分流技术研究[D].西安:长安大学,2008.
- [6] 归翀,崔通.浅析高速公路改扩建施工中的交通组织和保通方案[J].科技信息,2013(9):367.

(上接第166页)

水剂等措施,拆模后宜进行蒸汽养护。如是现浇接缝等少量应用,可按自然养护(覆膜保湿)处理。从预制厂制造经验来看,蒸汽养护在经济成本上仅增加棚架和小型电-汽锅炉,时间仅多3d,对批量生产构件的总成本影响不大。

5 结 语

(1)结合工程方案设计了多种体系盖梁方案并进行比较,提出相关适用场景和注意事项,为实际应用提供参考。

(2)对多种整体预制UHPC(组合)盖梁进行静载试验和空间有限元计算,充分了解其受力性能和破坏过程,论证了其结构的可靠性和安全性。

(3)总结UHPC试件施工过程中的若干关键点,为今后设计和施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司.长沙市湘府路快速化改造工程预制拼装桥梁下部结构轻型化研究[R].上海:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,2019.
- [2] 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司.全预制装配式桥梁盖梁轻型化关键设计技术研究[R].上海:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,2021.
- [3] 陈伟卫.超高性能混凝土(UHPC)预制装配式盖梁设计分析[J].中国市政工程,2019(2):43-49.
- [4] 李立峰,叶萌,胡方健,等.预制大悬臂预应力UHPC薄壁盖梁抗弯性能的试验研究[J].土木工程学报,2020(2):92-104.
- [5] 李立峰,唐金良,胡方健,等.全预制轻型预应力UHPC薄壁盖梁抗剪性能试验研究[J].中国公路学报,2020(8):144-158.