

中国第一座超高性能混凝土(UHPC) 公路箱梁桥的设计与施工

陈宝春¹, 黄卿维¹, 苏家战¹, 郭斌², 马熙伦³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 中交一公局桥隧工程有限公司; 3. 宁夏大学 土木与水利工程学院)

摘要:超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)近年来在中国桥梁工程中的应用越来越多,尤其是在局部构件与结构中,但在主体受力结构中的应用还相对较少。该文介绍中国首座 UHPC 公路箱梁桥——石磁高速公路 K34+690 跨线桥的设计与施工。该桥为 4×30 m 连续箱梁桥,横截面由 3 片单箱单室箱梁构成,采用预制拼装施工、先简支后连续的施工方法。进行了 30 m 简支箱梁的足尺破坏试验与优化设计。

关键词:UHPC; 箱梁; 设计; 施工; 公路桥梁

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种具有极高抗压强度、较好的抗拉性能和良好耐久性的先进水泥基材料,它的应用符合世界向低碳、环境友好、可持续发展的趋势,故在土木工程领域的应用不断推进,尤以在桥梁工程中的应用最为突出。然而,由于材料成本较高,在桥梁工程中的应用以结构局部和部分构件(如钢桥面板)等为主, UHPC 的桥梁还相对较少,主要的应用国家有中国、韩国、德国、马来西亚、瑞士、日本、美国等。此处所述的 UHPC 桥梁采用了材料划分的原则,指上部结构主要建筑材料为 UHPC 的桥梁,不包括结构局部和部分构件采用 UHPC 的桥梁。该文介绍中国第一座 UHPC 公路箱梁桥的设计与施工情况、足尺简支箱梁破坏试验和后期的优化设计,可为中国 UHPC 桥梁的应用与研究提供参考。

1 桥梁设计

该桥位于北京—珠海(京珠)国道主干线河北省石家庄至磁县(石磁)高速公路 K34+690 处,为跨越该高速公路的车行桥,简称石磁高速 K34+690 跨线桥。桥梁荷载等级为公路—Ⅱ级,为斜交 45°的连续梁,跨径布置为 4×30 m,总长 127 m。主梁横向由 3 片预应力 UHPC 小箱梁构成。设计时,中国还没有 UHPC

材料的相关标准,要求主梁的 UHPC 立方体(100 mm×100 mm×100 mm)抗压强度标准值不小于 130 MPa,棱柱体(100 mm×100 mm×300 mm)弹性模量不低于 40 GPa,坍落度为 140~180 mm,扩展度为 170~220 mm,含气量为 2%~4%,设计推荐并经现场试配后的配合比见表 1。UHPC 主梁结构分为预制梁段和后浇湿接缝与横隔梁两部分,由于后浇梁体受现场条件限制,其高温养护效果与预制梁体有所差异,为保证后浇 UHPC 的力学性能与预制梁段相近,将后浇 UHPC 的钢纤维掺量从预制梁体的 157 kg/m³ 提高到 236 kg/m³,即表 1 中的括号外和括号内的数值。普通钢筋采用 HPB300 和 HRB400 钢筋。预应力钢绞线采用抗拉强度标准值为 1 860 MPa,公称直径为 15.2 mm 及 12.7 mm。

表 1 UHPC 配合比 kg/m³

水泥	硅灰	细砂	减水剂	钢纤维	水
851	255	996	21	157(236)	199

桥面宽度为 8 m,横向布置为 0.5 m(护栏)+7 m(2 个行车道)+0.5 m(护栏),桥面铺装采用 5 cm 厚沥青混凝土+8 cm 厚的 C50 混凝土,设置 1.5% 的双面横坡。下部结构为柱式墩、台,钻孔灌注桩基础,采用钢筋(普通)混凝土结构。桥位总体布置示意图

收稿日期:2021-08-31(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFC0705405);国家自然科学基金资助项目(编号:51878178)

作者简介:陈宝春,男,教授。E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn

1,主梁横断面见图2。

主梁横向由3片预应力UHPC小箱梁构成,箱梁之间中心距为2.8 m,中、边梁预制宽度均为2.3 m,由宽0.5 m、厚0.12~0.15 m的现浇带连成整体。箱

梁中心高1.6 m,顶板厚0.18 m,底板在跨中处厚0.18 m,在支点处加厚至0.24 m,腹板在跨中处厚0.15 m,在支点处加厚至0.20 m。预制箱梁横截面布置见图3。

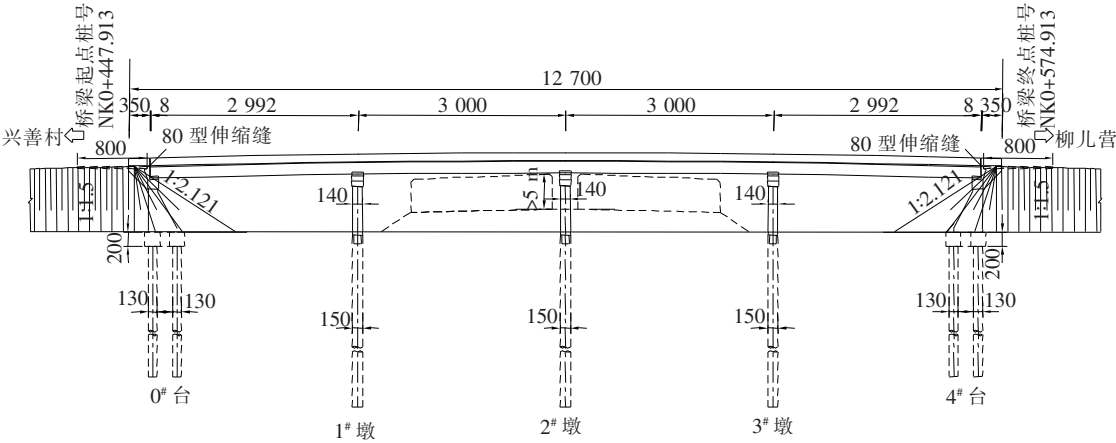


图1 桥梁总体布置图(单位:cm)

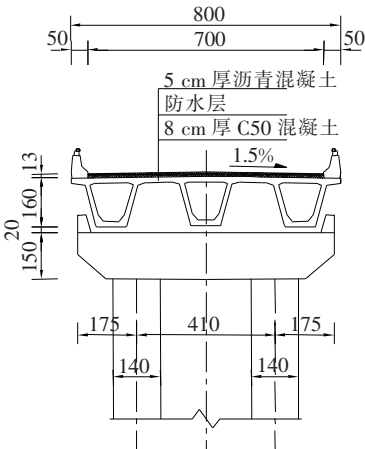
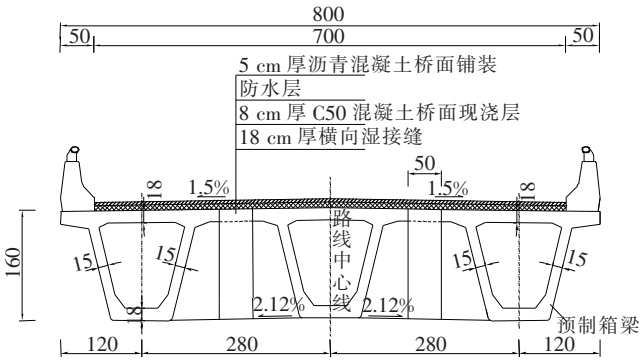


图2 主梁横断面图(单位:cm)

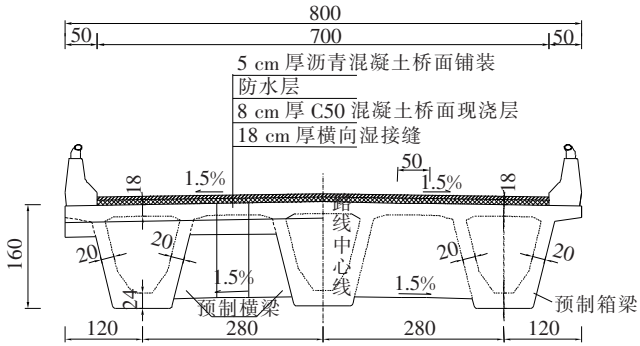
2 结构计算

利用Midas/Civil软件建立杆系有限元模型进行设计计算,采用梁单元模拟UHPC主梁,虚拟横梁模拟横向主梁之间的湿接缝连接,弹性连接模拟支承处支座的边界条件。有限元模型共有825个节点,1322个单元。

由于大桥设计时中国还没有UHPC桥梁的相关设计规范,因此设计计算主要依据当时的公路桥梁规范:JTGD60—2004《公路桥涵设计通用规范》、JTGD62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》并参考《超高强度纤维增强混凝土结构设计与



(a) 一般截面



(b) 支点截面

图3 主梁构造图(单位:cm)

施工指南(草案)》(日本)进行,其中UHPC的轴心抗压、抗拉强度标准值及强度设计值,按表2采用(表中下标c代表抗压,t代表抗拉)。

表3为承载能力极限状态下的主梁正截面抗弯承载力验算结果。从表3可以看出:4个控制截面均能

表 2 UHPC 强度标准值与设计值 MPa

标准值		设计值			
		承载能力极限状态		正常使用极限状态	
f_{ck}	f_{tk}	f_{cd}	f_{td}	f_{cd}	f_{td}
72.8	4.66	56.0	3.59	72.8	4.66

表 3 承载能力极限状态组合下主梁正截面验算结果

截面位置	单元号	$M_d /$ (kN · m)	γ_0	$\gamma_0 M_d /$ (kN · m)	$M_u /$ (kN · m)	验算结果
第一孔跨中截面	560	7 411	1	7 411	8 352	满足要求
1# 墩顶支点截面	596	6 341	1	6 341	11 421	满足要求
第二孔跨中截面	629	7 308	1	7 308	8 352	满足要求
2# 墩顶支点截面	661	7 361	1	7 361	11 421	满足要求

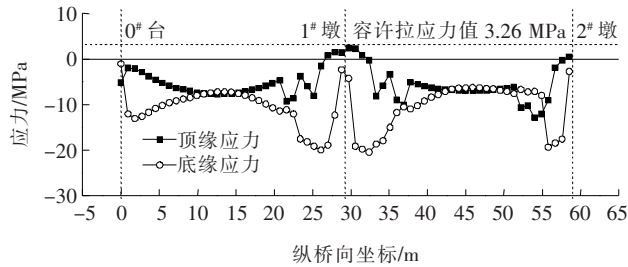


图 4 正常使用短期效应组合作用下主梁应力验算结果

值 50 mm,满足要求。

3 桥梁施工

UHPC 箱梁的施工分为以下步骤:① 主梁梁段预制施工,张拉底板预应力钢束 N1、N2、N3;② 梁段吊装,置于桥墩台上,进行梁体拼接,张拉顶板预应力钢束 T1、T2、T3,施工横向湿接缝,将横向 3 片梁连成整体;③ 拆除临时支撑,完成体系转换(简支转连续);④ 施工二期恒载铺装。

因桥梁跨径不大,总体而言施工难度不大,以下主要介绍与 UHPC 有关的关键施工工艺。

UHPC 搅拌时的投料顺序为骨料、钢纤维、水泥、矿物掺合料,干料先预搅拌 4 min 以上;或投入预先拌制均匀的固态混合物,加水和液体组分后再搅拌 4 min 以上。在混凝土搅拌机的下料装置上应有防止钢纤维结团的装置。在拌制过程中,搅拌时间根据实际情况进行适当调整。

预制梁体采用蒸气养护,为此专门搭建了蒸养房,测试结果表明:房内的温度可达 90 ℃ 以上。之后,开展了梁段的试制。通过梁段试制可知:UHPC 由于没

满足规范要求。

图 4 为正常使用短期效应组合作用下的主梁拉应力验算结果。从图 4 可知:所有截面顶边缘均未超过容许拉应力,满足要求。

主梁在长短期效应作用下的挠度计算结果,长期效应的最大挠度值为 14.3 mm,小于规范规定的容许

有粗骨料,对模板的密封性能要求较严。同时,由于其早期收缩较大,要及时进行内模松动。在梁段试制成功后,开始进行实梁的制作。

UHPC 预制梁的养护过程分为静停、高温蒸气养护和自然养护 3 个阶段。① UHPC 成型完毕后静停 6 h 以上,静停时环境温度为 10 ℃ 以上、相对湿度为 60% 以上;② 静停完毕后放入蒸养房进行蒸气养护,升温速度应不大于 12 ℃/h,升温至 80 ℃ 后,保持恒温 (80±3) ℃ 72 h 或直至同条件养护试件的抗压强度达到设计值,再以不超过 15 ℃/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 ℃。升温养护过程的环境相对湿度应保持在 95% 以上;③ 构件终养结束后再进行自然养护,环境平均气温应高于 10 ℃,构件表面保持湿润不少于 7 d。

2014 年底 UHPC 箱梁预制完成。随后进入冬季,考虑到难以进行现浇带的 UHPC 施工,故暂停到 2015 年春天,才将主梁吊到墩台上。后浇的纵桥向湿接缝与墩上简支转连续处的湿接缝,也采用蒸气养护,同样经过静停、蒸养和自然养护 3 个阶段。由于现场保温采用的是保温膜,保温条件有限,设计要求达到 60 ℃,通过增加湿接缝处钢纤维的掺量(从 2% 提高到 3%,如表 1 所示),使其与预制部分的 UHPC 性能匹配。现场保温膜内的温度,实测可达 70 ℃ 以上。

4 优化设计与足尺破坏试验

石磁高速 K34+690 跨线桥作为中国第一座公路 UHPC 桥梁,设计时偏于保守地基本保持了原设计的预应力(普通)混凝土箱梁桥结构,只是截面板厚有所

减薄,混凝土用量减少有限,钢筋与预应力筋基本维持了原设计,使 UHPC 的材料性能没有充分发挥,经济性相对较差。为此,在当时的技术条件情况下,开展了第一次优化分析。优化后的截面尺寸外轮廓与图 3 相同,只是减薄了箱梁的板厚。优化后,顶板厚跨中截面为 0.08 m、支点截面为 0.12 m;底板厚跨中截面为 0.15 m、支点截面仍为 0.24 m;腹板厚跨中截面为 0.08 m、支点截面为 0.12 m。预应力钢绞线减小为 5 束 $\phi^s 15.2$ mm。

应用施工中的外模板和调大尺寸的内模板(以减小优化后的箱梁板厚)和蒸养设备,制作了一根足尺试验梁,实测的 UHPC 立方体(100 mm 边长)强度为 145.6 MPa,抗拉强度为 8.02 MPa,弹性模量为 42.3 GPa。在室外现场进行了模型梁破坏试验。试验梁总长 30 m,计算跨径为 29.6 m,支承于高 50 cm 的台座上。用汽车起重车配重钢锭进行加载,通过分配梁形成距跨中截面各 1 m 的两点集中力。测量了试验梁的挠度、钢筋和混凝土应变、裂缝等。试验结果:初裂荷载为 615 kN,加载到 1 815 kN 时,梁的跨中挠度达 424 mm(约为跨径的 1/70),由于梁底离地面仅余 76 mm,停止试验,将所对应的荷载 1 815 kN,作为试验梁的试验极限荷载。此时,荷载一位移曲线已接近水平线,结构已接近理论极限荷载值,有限元分析也证实了这一结论。

实桥为先简支后连续梁,以跨中的正弯矩控制设计,试验梁为简支梁,通过等效计算,当所施加的试验荷载达 692 kN 时,达到了实桥跨中正弯矩的设计极限荷载。足尺试验与有限元分析表明:当荷载达到 800 kN 时(超过了等效设计极限荷载),底板预应力筋应变仅为 $1\,029\ \mu\epsilon$,远低于其名义屈服应变 $2\,589\ \mu\epsilon$;当试验加载达 1 177 kN(约 2 倍的等效设计极限荷载),底板预应力筋的应变也仅为 $2\,056\ \mu\epsilon$;直到加载至 1 519 kN 时,才达到屈服。当施加到试验极限荷载 1 815 kN 时,受压区 UHPC 的压应变仍小于 $1\,000\ \mu\epsilon$,未达到其抗压强度。试验停止时,受拉区 UHPC 裂缝最大宽度为 6 mm。

试验结果表明:UHPC 足尺试验梁仍有优化的空间。为此,文献[14]进行了二次优化,除进一步减薄箱梁板壁的厚度、减少预应力筋用量外,认为 UHPC 一定的抗拉强度可以增强混凝土的抗剪性能,可免除普通钢筋,将其设计成无腹筋梁。经济性分析表明:二次优化后 UHPC 桥的造价仅为预应力(普通)混凝土桥

的 1.04 倍。若考虑下部结构的进一步优化,或从全寿命周期考虑,其经济效益将十分明显。事实上,马来西亚的实践表明,UHPC 的一次性投资成本可以比现有普通混凝土桥经济,从可持续观点来看,社会经济效益则十分明显。

5 结语

石磁高速 K34+690 跨线桥于 2015 年 5 月建成通车,多年来桥梁运行情况良好。在当时的技术条件下,作为中国第一座公路 UHPC 桥梁,对该桥的设计、施工等方面进行了探索,开展了足尺梁的破坏试验和优化设计。虽然今天 UHPC 在中国桥梁中的应用越来越多,但预应力 UHPC 箱梁的应用还不多,石磁高速 K34+690 跨线桥所取得的技术成果与经验,对推动中国 UHPC 工程应用具有积极的意义。

参考文献:

- [1] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土(UHPFRC)研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014(3).
- [2] 陈宝春,韦建刚,苏家战,等.超高性能混凝土(UHPC)应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019(2).
- [3] XUE J. Q., BRISEGHIELLA B., HUANG F. Y., et al. Review of Ultra-High Performance Concrete and its Application in Bridge Engineering[J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119 844.
- [4] CHEN Baochun, HUANG Qingwei, SHEN Xiujiang, et al. Two Pilot UHPFRC Bridges in China[C]. Proceedings of the 1st International Symposium of ACF on Ultra High Performance Concrete, 7th October 2015, Klokata, India: 83-92.
- [5] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J].材料导报(A),2017(12).
- [6] 杜任远,黄卿维,陈宝春.活性粉末混凝土桥梁应用进展[J].世界桥梁,2013(1).
- [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(2).
- [8] 马熙伦,陈宝春,黄卿维,等.德国加特纳普拉兹超高性能混凝土人行桥[J].中外公路,2017(2).
- [9] 陈宝春,黄卿维,王远洋,等.我国第一座超高性能混凝土(UHPC)拱桥的设计与施工[J].中外公路,2016(1).
- [10] 陈宝春,陈友杰,赵秋.桥梁工程[M].3版.北京:人民交通出版社有限公司,2017.
- [11] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].