

法国一座超高性能混凝土斜腿刚构桥设计介绍

陈宝春¹, 李聿胜¹, 韦建刚^{1,2}, 陈逸聪¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建工程学院)

摘要:法国开展超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, 简称 UHPC)研究, 始于 20 世纪 90 年代所研发的活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)。此后, 随着应用的开展, 最早制订了相关的指南和规范, 成为世界上推动 UHPC 发展的重要力量之一。该文首先从应用、规范与学术交流等方面对法国 UHPC 的研究与应用进行概要性介绍, 然后重点介绍一座 UHPC 斜腿刚构桥的设计。

关键词:超高性能混凝土(UHPC); 斜腿刚构; 设计; 工程; 规范

自 1994 年超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, 简称 UHPC)的概念提出以来, 其研究与应用发展进展迅速。一般认为, 它最早可追溯到 20 世纪 70 年代丹麦 Densit 开始的密实配筋复合材料(Compact reinforced composite, CRC)的研发。20 世纪 90 年代, 法国 Bouygues 公司研发的活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC), 则被认为是最早较为成熟的 UHPC 的一种。在法国的研究与应用中, 通常 UHPC 中采用纤维增强, 因而称之为超高性能纤维增强混凝土(Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete, 简称 UHPFRC)。所以, 该文中的 UHPC 包含了 RPC、UHPFRC 等材料。

目前, UHPC 材料与结构的研究与应用已成为世界土木工程领域的热点, 法国是推动其发展的重要力量之一。该文首先概要性介绍法国 UHPC 的研究与应用, 然后重点介绍一座超高性能混凝土斜腿刚构桥的设计。

1 UHPC 在法国的研究与应用概况

1.1 应用

法国在土木工程领域的创新能力较强。以桥梁为例, 部分斜拉桥、波形钢腹板预应力混凝土梁桥等桥型均由法国专家提出, 随后在世界各地得到发展。同时, 法国土木工程界对创新的接受能力也比较强。UHPC 新材料出现后, 它在法国的接受度一直稳定增长。到了 20 世纪 90 年代中期, 它被认为是土木工程领域潜

在的“革命性”材料。由于它的耐久性、构件轻巧和表面细致美观, 尤其受桥梁工程师和建筑师青睐。

1998 年, 法国电镀公司(Électricité de France)在卡特农核能发电厂(Cattenom Nuclear Cooling Towers)中安装了预应力预制 UHPC 梁。2014 年, UHPC 被用于法国马赛标志性项目欧洲和地中海文明博物馆(MuCEM)的建筑镂空围护(图 1)。

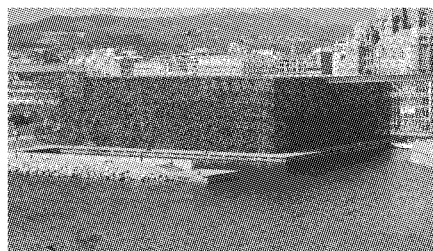


图 1 地中海文明博物馆

此后, UHPC 在法国的应用不断扩展, 尤其是在法国的南部地区, 如该文将要介绍的 UHPC 斜腿刚构桥所在的蒙彼利埃(Montpellier), 除了该桥外, 还有多座建筑物采用 UHPC 外墙挂板, 新建的高速铁路火车站, 整个屋盖全部采用 UHPC 结构(图 2)。

1.2 规范

UHPC 出现之初, 工程界缺乏了解, 在没有标准支撑、材料单价较高的情况下, 它在市场上没有竞争力。同时, 市场上 UHPC 材料的供应也有限, 严重阻碍了其推广应用。

UHPC 并不是简单地提高混凝土的抗压强度。它的抗拉强度也得到了提高, 且由于纤维的桥接作用,

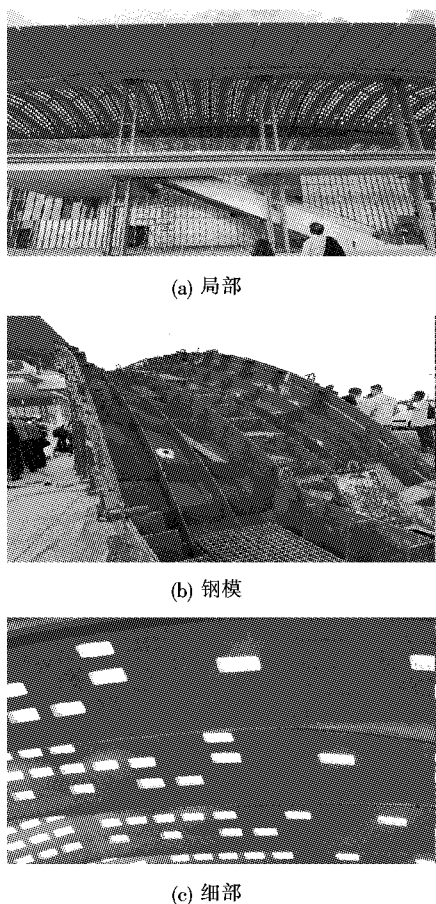


图 2 蒙彼利埃高铁站 UHPC 屋盖

基体受拉开裂后,抗拉强度仍能增长,也就是说有假性硬化段,这就允许 UHPC 材料的抗拉能力在结构设计中考虑,而对于普通混凝土来说,结构设计规范通常是不考虑混凝土的抗拉性能的。这就需要有专门的 UHPC 相关标准来支持这一概念的应用。同时,UHPC 的耐久性通常比高性能混凝土高出一个数量级,因此,需要合适的材料测试标准,以使得工程应用时能充分发挥 UHPC 的耐久性。

法国十分重视 UHPC 标准的制定。20 世纪 90 年代末,法国土木工程协会就开始编写 UHPC 的指南。2001 年公布了初版的指南,是世界上第一个有关 UHPC 的标准类文件。该指南在 2013 年进行了修订。近年,法国标准协会颁布了两份关于法国 UHPC 的标准 NF P 18-470 和 NF P 18-710。

NF P 18-470 是关于 UHPC 材料的标准,于 2017 年颁布实施。它提出新拌和硬化后的 UHPC 性能,制定了原材料选择、测试方法和质量保证/质量控制要求的原则。它还根据 UHPC 的硬化耐久性和强度(抗压强度和直接拉伸强度)性能,对不同类别的 UHPC 进行分类。标准规定了从 130 MPa 到 250

MPa 的 5 种抗压强度,并且规定了 3 种从应变硬化到应变软化的直接拉伸强度。此外,还包括生产(配料、运输、浇筑、固结和养护)和确认现场硬化性能的方法。

NF P18-710 是对欧洲规范 2“混凝土结构设计”的补充,于 2016 年颁布实施。它规定了建筑物和土木工程结构中含有纤维增强的无筋、加筋和预应力 UHPC 的结构设计原则。该标准提供了 UHPC 压缩、拉伸、剪切性能分析和设计的规则和模型。标准提供了可靠性管理、极限状态设计和耐久性设计。此外,该标准基于柱或板的受弯试验,提出通过反向分析,确定 UHPC 直拉性能的一套方法。

这两份标准的颁布,不仅对法国推广 UHPC 的应用产生了极其重要的作用,也对世界各国制订 UHPC 标准提供了重要的参考。

1.3 学术交流

法国于 2009 年在马赛举办了第一届超高性能纤维增强混凝土国际会议(International Symposium on UHPFRC),此后,2013 年和 2017 年又分别举办了第二届和第三届,吸引了世界各国 UHPC 的学者和专家参加,成为世界 UHPC 领域重要的学术会议,所出版的论文集也成为有关 UHPC 研究的重要文献。第四届将于 2021 年举办。除这种固定的会议外,它还举办了其他一些活动,如 2018 年 9 月在法国南特召开的 UHPC 的 Workshop,邀请知名的专家,提供短期课程,介绍 UHPC 规范的制订背景、工程设计与应用经验。此外,法国还推进他国 UHPC 的应用。如,2002 年法国承包商 Bouygues 公司还采用从法国进口的 UHPC 和法国的设计方法,在韩国首尔建造了韩国第一座 UHPC 人行桥(仙游桥)。

2 UHPC 斜腿刚构桥

2.1 桥梁方案

这座桥位于法国南部的蒙彼利埃,名为 La République (法兰西共和)桥。它跨越勒兹(Lez)河。

勒兹河宽约 70 m,是一条季节性河流,大部分时间其水量不大、流速平缓,有时甚至几乎干涸。但在洪水季,可在几个小时内,水位高度突然之间达到 10 m 左右,流速很快,经常给河岸造成很大的损害。因此,在 2010 年决定修建一座公路桥时,对桥梁方案的要求是河中不设桥墩。

蒙彼利埃位于法国南部,地中海沿岸,经莱兹河与海相通,灿烂的阳光,古老的街区,绚丽的花园,使其成

为法国重要的旅游地。大方案竞标中,由建筑师和工程师提出的 UHPC 的斜腿刚构桥方案中标,击败了悬索桥、桁架梁、系杆拱等方案。

由于采用了 UHPC 这种材料,桥墩(斜腿撑杆)和上部结构(桥面板)构件尺寸均很小,使得整体结构轻巧,通透度高。同时,结构自重轻,能适应桥位处软弱地基条件。此外,主要构件均为预制,现场施工时间大大缩短,可在两次洪水之间完成现场作业(实际施工时只用了 4 个月)。为了避免 UHPC 中钢纤维在构件表面锈蚀对外观的影响,该桥的 UHPC 中的纤维采用了不锈钢纤维,并专门对不锈钢纤维增强的 UHPC 进行了研发。

2.2 总体布置

该桥为三跨斜腿刚构桥,跨径组合为(24+25+24) m,桥宽 17 m,斜撑高 9.67 m(垂直投影)。上部结构总高仅 80 cm,由 17 根 UHPC 工字梁和桥面板组成。斜撑斜角为 45°,与梁一一对应,一个墩也有 17 根。桥台与桥墩基础为桩基础,其中斜撑下布置有斜桩。总体布置图见图 3。

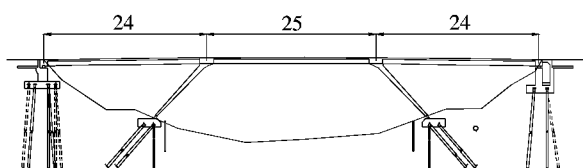


图 3 UHPC 斜腿刚构桥总体布置图(单位:m)

建成后的大桥如图 4 所示。

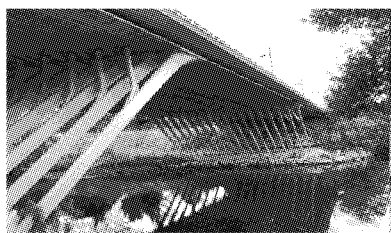


图 4 UHPC 斜腿刚构桥照片

2.3 结构设计

梁的截面尺寸见图 5。梁高 58 cm,下翼缘较大,为预制构件。腹板厚度从跨中的 10 cm 增加到两端的 15 cm,以适应抗剪需要。由于梁高较小,采用了预应力,以提高刚度,且预制时留有预拱度。桥面板为现浇钢筋混凝土板。

梁的 UHPC 中采用长度为 20 mm 的钢纤维,掺量为 2.5%,28 d 抗压强度为 165 MPa,28 d 特征最大开裂后应力为 7.1 MPa,弹性模量为 57 GPa。

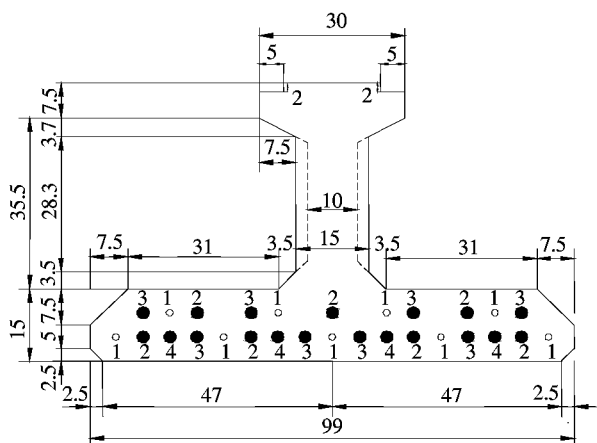


图 5 主梁截面尺寸(单位:cm)

斜撑具有复杂的几何形状,它采用异形截面且沿着长度方向为变截面,底部截面小,往桥面高度方向加大,见图 6。

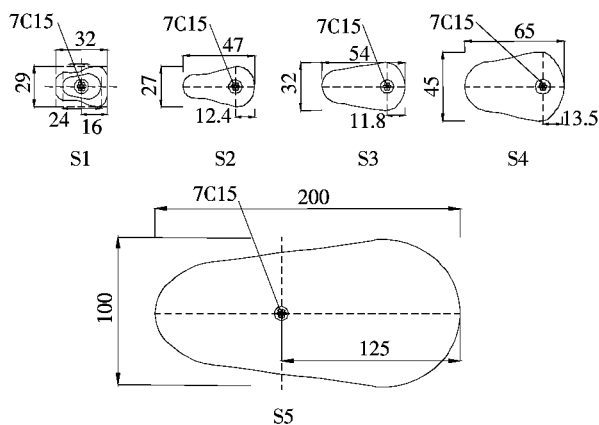


图 6 斜撑截面尺寸(单位:cm)

斜撑的 UHPC 中采用长度为 13 mm 的不锈钢纤维,掺量为 1.25%,28 d 抗压强度为 150 MPa,28 d 特征最大开裂后应力为 6.0 MPa,弹性模量为 52 GPa。

从建筑造型需要,在每一根斜撑顶部,伸出了一根小支杆,截面如图 7 所示,阳光照到水面反射到桥面底板的照片见图 8。

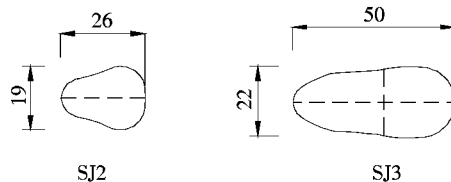


图 7 斜撑小支杆截面尺寸(单位:cm)

斜撑也是预制构件,每根配有 5 根集中布置的预应力筋。预应力索始终是直的,用于抵消由恒载引起的弯矩,其在构件中的位置是变化的,如图 9 所示。预

应力索采用后张法锚固于基础承台上。斜撑与承台的连接为铰接,如图9所示。

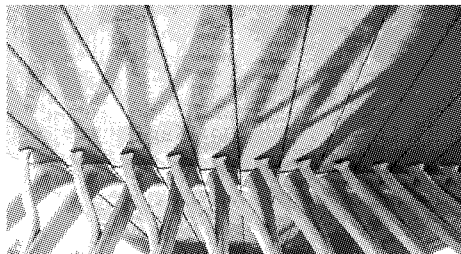


图8 斜撑顶部局部照片

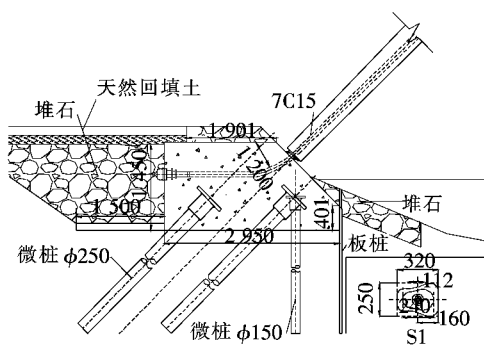


图9 斜撑与基础的连接构造(单位:cm)

斜撑与主梁之间采用现浇 UHPC 连接,见图10。

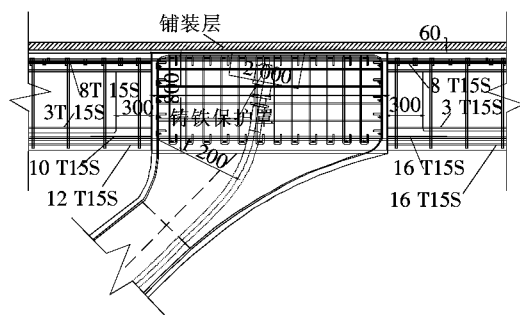


图10 斜撑与主梁的连接构造(单位:cm)

3 结语

中国桥梁仍处于大规模建设时期,UHPC能满足结构向更高、更长、更复杂的受力需求和低碳、环保、耐久性好的社会可持续发展需求,在中国有着广阔的应

用前景。该文对法国 UHPC 应用与研究进展及一座斜腿刚构桥的介绍,希望有助于促进 UHPC 在中国的应用推广,尤其是在桥梁结构中的创新性应用。

参考文献:

- [1] 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(3).
- [2] 陈宝春,韦建刚,黄伟,等.超高性能混凝土(UHPC)应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019(1).
- [3] 陈宝春,彭桂瀚.部分斜拉桥发展综述[J].华东公路,2004(3).
- [4] 陈宝春,黄卿维.波形钢腹板PC箱梁桥应用综述[J].公路,2005(7).
- [5] V H Perry. What Really is Ultra-High Performance Concrete - Towards a Global Definition[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures, Fuzhou; RILEM Publications S. A. R. L., 2018; 89-105.
- [6] François Toutlemonde, Sébastien Bernardi, Yves Brugeaud, et al. Twenty Years - Long French Experience in UHPFRC Application and Paths Opened from the Completion of the Standards for UHPFRC[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on UHPC Materials and Structures, Fuzhou; RILEM Publications S. A. R. L., 2018; 61-83.
- [7] NF P 18-470 Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UPHFR) - Specification, Performance, Production and Conformity[S].
- [8] NF P 18-710 National Addition to Eurocode 2 - Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UPHFR)[S].
- [9] 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).
- [10] Romain Ricciotti, Frédéric Pastor, Ziad Hajar, Sébastien Bernardi, La Republique Bridge in Montpellier, Proceedings of the AFGC-ACI-Fib-RILEM Int. Symposium on UHPFRC, Montpellier; RILEM Publications S. A. R. L., 2017; 727-736.