

一种新型跨海大桥非通航孔桥型及其应用前景初探

周之栋, 周 聪*

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月21日; 发布日期: 2026年6月30日

摘 要

为适应国内跨海大桥建设的需要, 结合超高性能纤维增强混凝土(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, 简称UHPFRC), 本文提出了一种适用于跨海大桥非通航孔的新型组合箱梁结构形式, 由UHPFRC腹板和底板、高强混凝土顶板组成。和常规混凝土箱梁相比, 该组合箱梁具有自重轻、跨度大、混凝土开裂风险低、徐变效应小、耐久性能好等优点。以一座 4×100 m组合箱梁桥为例进行了结构设计和仿真分析, 获得了结构应力和变形状态, 并对UHPFRC材料的设计应力取值大小和耐久性进行了调研和分析, 以此进行讨论。结果表明: 主梁各项应力值均满足UHPFRC材料应力限值, 结构刚度与耐久性满足要求, 完全具有施工可行性; 与常规PC箱梁桥、组合钢箱梁相比, 该新桥型具有良好的经济性指标。因此, 本文提出的新型组合箱梁在受力、经济、耐久性等方面具有极大的竞争优势, 可很好地适用于跨海大桥非通航孔区域, 有着极为广阔的推广应用前景。

关键词

跨海大桥非通航孔桥型, UHPFRC, 组合箱梁, 设计应力限值, 耐久性

Preliminary Study on a New Bridge Type for Non-Navigable Spans of the Cross-Sea Bridge and Its Application Prospects

Zhidong Zhou, Cong Zhou*

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: May 29, 2026; accepted: June 21, 2026; published: June 30, 2026

*通讯作者。

Abstract

Aiming to adapt the demand of cross-sea bridge construction in China, a new composite box girder for non-navigable spans of the cross-sea bridge was proposed combining Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), which consists of the web and the base plate with the UHPFRC and the top plate with the high-strength concrete. Compared with conventional concrete box girder, this new composite box girder possesses a lot of merits, including light weight, large span, low cracking risk, low creep, good lasting quality and so on. Structural design and analytical analysis for the new composite box girder with span length of 4×100 m were presented, structure stress and deformation state of the computational model were acquired. In addition, stress value for design and durability of UHPFRC were investigated. Discussion was given and the results showed that stress value of the girder all meet the material stress limit. Also, the structural stiffness, durability, and construction feasibility all meet the demand. Then, compared with conventional prestressed concrete box girder and steel-concrete composite box girder in economic indicator, the results showed that a good economy may be achieved by using this new type. Above all, the new composite box girder proposed in this paper is a competitive bridge type in mechanical properties, economy, durability and other aspects, which could apply to non-navigable spans of the cross-sea bridge well and demonstrates a good prospect of application and extension.

Keywords

Bridge Type for Non-Navigable Spans of the Cross-Sea Bridge, UHPFRC, Composite Box Girder, Stress Limit for Design, Durability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

近年来,我国高速公路交通网络的建设日趋完善,这对国家经济的发展起到了巨大的促进作用,使国家有足够的经济实力和长远的战略目光,将交通建设延伸至沿海地区跨越海湾和海域,特别是跨海大桥的建设中,积极促进沿海地区经济的快速发展[1]-[3]。目前,我国已建、在建和规划的跨海大桥有数十座之多。

跨海大桥的规模普遍都非常庞大,长度可从数公里到数十公里不等、投资从几十亿到几百亿元,需要跨越海域环境,水文、地质、气候等条件非常复杂。因此,跨海大桥的建设规模、技术设计难度比常规公路桥梁要大得多,其耐久性、长期使用性能方面的要求更为苛刻。从结构总体布置上来说,跨海大桥可分为通航孔与非通航孔两大部分,对于通航孔部分,一般为1个或2个主通航孔,其桥型和结构形式的选择取决于桥位处的海域环境、通航、地质等多种综合因素,一般为斜拉桥或悬索桥结构,本文不予讨论;而对于非通航孔部分,由于占跨海大桥绝大部分,因此非通航孔桥梁的总长、工程量、工程投资在整个跨海工程中占有相当大的比例。以东海大桥为例,非通航孔全长约20 km,占全线桥梁工程量的90%左右。因此,非通航孔是全桥设计、施工、运营、养护的重中之重,同时,作为非通航孔桥梁,为方便设计、运输、施工,一般选择单一、标准跨径的梁桥作为其主要结构形式,因此桥梁结构型式、跨径大小的选择显得尤为重要。

超高性能纤维增强混凝土(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)自20世纪90年代中期由法国学者 Richard 和 Cheyrezy 首次提出以来,因其超高强度、高耐久性和优异的韧性,迅速

成为土木工程领域的研究热点。该材料由级配石英砂、水泥、活性矿物掺合料、高效减水剂、钢纤维以及水按一定级配搅拌成型, 具有抗压强度 170~230 MPa、抗折强度 30~60 MPa、氯离子扩散系数仅为常规混凝土约 1/10 的卓越性能。近年来, 将 UHPFRC 与普通混凝土或钢材组合形成复合结构, 以发挥各自材料优势, 已成为国内外学术界和工程界关注的重要方向。

在国际上, UHPFRC-混凝土组合结构的研究起步较早, 成果丰富。瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)的 Brühwiler 教授团队在该领域进行了系统性研究, 围绕 UHPFRC 在既有钢筋混凝土结构加固中的受弯、受剪性能, 以及 UHPFRC 层与混凝土基层的界面粘结行为开展了大量的试验和理论分析工作。德国卡尔斯鲁厄大学的研究团队则在 UHPFRC 的孔隙结构、收缩徐变和长期性能方面开展了深入研究。在组合梁结构方面, 国际学者对 UHPFRC-混凝土组合梁的时变行为进行了系统探索, 研究表明“UHPFRC-混凝土”组合构件的主要变形在其龄期 7~9 天之前产生, 主要归因于 UHPFRC 在早期产生的自生变形和温度变形。在拉伸徐变方面, 最新研究表明 UHPFRC 的拉伸徐变受收缩应变影响显著, 在较高持续拉应力作用下, 前 13 天拉伸徐变速率较高, 此后逐渐趋于稳定。

在国内, UHPFRC 的研究和应用起步相对较晚, 但近年来发展迅速, 在桥梁工程中的应用已取得多项重要突破。邵旭东等提出了超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥的概念设计, 探讨了全 UHPC 箱梁在超大跨径桥梁中的应用可行性。方志、杨剑等对 FRP 和 RPC 在土木工程中的研究与应用进行了系统综述。在组合结构研究方面, 国内学者围绕自带钢销型钢-UHPFRC 新型组合梁的抗弯性能、钢-UHPC 正交异性组合桥面板的力学性能等方向开展了深入的试验研究和理论分析。在工程应用层面, 港珠澳大桥深水非通航孔采用了 6×110 m 连续钢箱梁桥并配合钢-UHPC 正交异性组合桥面板, 验证了大纵肋钢-UHPC 组合桥面板在中长跨度连续梁桥中的适用性, 其疲劳性能显著优于传统正交异性钢桥面板。最新工程实践方面, 山西首座 UHPC 组合梁桥已在国道 G337 忻州段古城桥改造示范项目中成功应用, 采用 UHPC-RC 装配式组合梁, 梁高降低 10%, 重量减轻 69.1%。

综合来看, 国内外 UHPFRC-混凝土组合结构的研究已取得显著进展, 但现有研究主要集中在钢-UHPFRC 组合桥面板、UHPC 整体箱梁、UHPFRC 加固既有结构等几个方向。对于采用 UHPFRC 腹板和底板、高强混凝土顶板的组合箱梁桥型, 尤其是针对跨海大桥非通航孔这一特定工程场景的系统研究, 尚属空白领域。目前, 我国已建、在建的跨海大桥项目中, 非通航孔桥型主要分两种: 预应力混凝土梁式桥, 跨径在 60~70 m 居多; 钢混组合桥, 跨径在 100 m 左右居多。本文在对其非通航孔桥型综合分析的基础上, 结合新型超高性能混凝土材料 UHPFRC, 提出了一种适用于跨海大桥非通航孔桥梁的新型组合箱梁结构形式, 并对其优劣性能和结构受力性能进行了分析。

2. 国内跨海大桥基本情况

2.1. 发展现状

Table 1. Representative cross-sea bridges in China

表 1. 我国具有代表性的跨海大桥

名称	桥梁长度(km)	投资(亿元)	建成时间
东海大桥	32.5	71	2005
杭州湾跨海大桥	36	118	2008
苏通大桥	32	85	2008
舟山跨海大桥	25	131.13	2009

续表

胶州湾跨海大桥	35.4	99.38	2011
港珠澳大桥	15	720	2018
大连星海湾跨海大桥	10.36	33.8	2015

我国于 1991 年建成第一座跨海大桥——厦门大桥，到目前为止，已建和拟建的跨海大桥共有 72 座，其中，到 2012 年建成 35 座，总投资达 814.8 亿元；在建项目 20 座，总投资 1278 亿元，总里程 174 公里；拟建项目 17 座，总投资 5188 亿元，总里程为 286 公里。表 1 列出了我国一些具有代表性的跨海大桥。

从上表可以看出，我国跨海大桥的建设呈现出大型化、常态化的趋势。

2.2. 非通航孔桥梁工程的特点

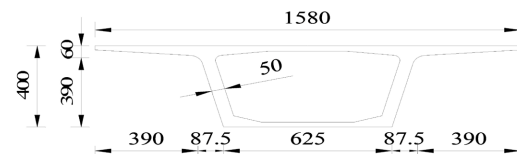
由于其特殊的海水环境、地理位置、气候、地质条件，跨海大桥非通航孔工程具有以下特点：

- (1) 投资巨大。跨海大桥工程规模庞大、因而投资巨大。
- (2) 跨度大、桥梁长。由于基础和水文条件均非常复杂，跨海大桥桥梁总长度大，普遍在 5 km 以上、甚至 20~30 km 以上。
- (3) 结构形式单一。非通航孔桥梁结构形式一般为梁式桥，结构形式单一，施工方法则普遍采用工厂批量预制、并浮吊安装就位。
- (4) 基础施工及浮吊施工难度大。跨海大桥地处外海环境，作业环境恶劣，受风、潮汐、海流等因素影响，桩基础施工难度及浮吊施工难度大大增加。
- (5) 耐久性要求高。海水环境中氯离子含量高，氯离子将对混凝土产生侵蚀，因而对混凝土的耐久性要求特别高。

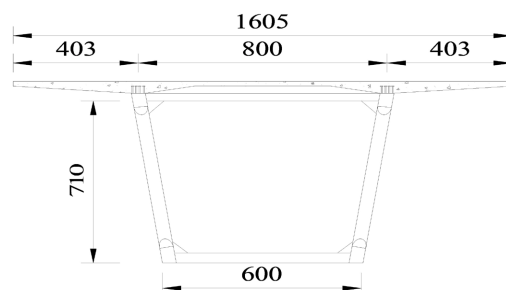
3. 现有非通航孔桥型及存在的问题

3.1. 桥梁结构形式

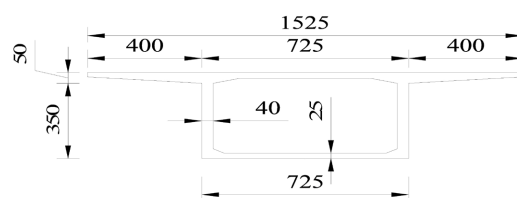
国内常用的非通航孔桥型主要是预应力混凝土箱梁、钢-混凝土组合梁、钢桁组合梁等三种。对于后两者，只有上海长江大桥和港珠澳大桥等少数几座跨海大桥采用，而几乎所有的跨海大桥非通航孔桥型基本都采用预应力混凝土箱梁这种桥梁结构形式。



(a) 杭州湾跨海大桥预应力混凝土箱梁(跨径 70 m)



(b) 港珠澳大桥钢桁叠合连续梁(跨径 120 m)



(c) 东海大桥预应力混凝土箱梁(跨径 70 m)

Figure 1. Cross-sectional forms of several non-navigable spans of the cross-sea bridges in China (Unit: cm)**图 1.** 几座跨海大桥非通航孔横断面形式(单位: cm)

表 2 总结了国内几座跨海大桥非通航孔桥型的基本情况, 图 1 为其主梁的横断面形式。

Table 2. Basic information of several non-navigable spans of the cross-sea bridges in China**表 2.** 国内几座跨海大桥非通航孔桥梁基本情况

跨海大桥	桥型	非通航孔跨径(主要部分)	单跨梁自重
杭州湾跨海大桥	预应力混凝土等高连续箱梁	北引桥: $24 \times 50 \text{ m} + 21 \times 70 \text{ m}$ 中引桥: $134 \times 70 \text{ m}$ 南引桥: $20 \times 70 \text{ m} + 202 \times 50 \text{ m}$	50 m: 1430 t 70 m: 2160 t
东海大桥	预应力混凝土等高连续箱梁	$136 \times 60 \text{ m} + 154 \times 70 \text{ m}$	60 m: 1700 t 70 m: 2100 t
上海长江大桥	连续组合钢箱梁	北侧: $5 \times 105 \text{ m}$ 南侧: $5 \times 105 \text{ m}$	105 m: 2300 t
港澳大桥	浅水区: 连续组合钢箱梁 深水区: 钢桁叠合连续梁	浅水区: $64 \times 85 \text{ m}$ 深水区: $153 \times 120 \text{ m}$	85 m: 1400 t 120 m: 2100 t

3.2. 非通航孔结构优缺点

这 3 种非通航孔结构形式均有各自的特点及适用范围, 也存在一定的缺点, 而某些缺点在海洋恶劣环境下会被放大:

(1) 预应力混凝土箱梁: 混凝土箱梁具有竖向、横向及抗扭刚度大、稳定性好、施工方法成熟、工厂化预制等诸多优点。但其缺点有:

① 自重大, 合理跨径不宜过大、60~70 m 左右。这样非通航孔总跨数多, 下部结构工程量明显增大, 桥墩和钢管桩数量多, 这不仅增加了工程造价, 而且也将对海洋水流等造成影响[4]。

② 常规混凝土抗拉强度低、容易出现裂缝[5] [6], 而这会加速氯离子的侵蚀作用, 危害结构正常使用; 另外, 由于徐变等影响, 结构很容易出现下挠, 这也是该桥型的一个通病。

(2) 钢-混凝土组合梁: 钢-混组合结构同混凝土结构相比, 构件截面尺寸减小, 自重减轻, 跨径加大, 增加结构的延性等; 同钢结构相比, 用钢量减小, 刚度增大, 稳定性增加, 耐久性好等[7]。但也存在一些问题:

① 钢材消耗量大, 造价偏高。

② 海洋环境下钢材防腐问题是个长期的问题, 后期养护量大。

4. 超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)

未来桥梁的发展方向与高强度、高性能材料的发展密不可分[8]。因此将高性能、高强度材料引入桥梁领域是技术发展的一个趋势[9]。超高性能纤维增强混凝土(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, 简称 UHPFRC, 也称作活性粉末混凝土 Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)是由级配石英砂、水

泥、活性矿物掺合料、高效减水剂、钢纤维以及水按一定级配搅拌成型后在一定养护条件下结硬的新型混凝土材料[10], 具有以下优异性能[11]-[16] (见表 3)。

(1) 超高抗压及抗折强度。由于材料的高致密性, UHPFRC 具有极高的抗压强度, 掺加钢纤维后抗折强度较普通混凝土大幅提高。

(2) 优异的耐久性。由于具有良好的孔结构和较低孔隙率, UHPFRC 具有极低的渗透性、很高的抗环境介质侵蚀能力, 耐久性能卓越。

国内已有将 UHPFRC 材料运用于实际工程的先例[17]。基于其优异性能, 笔者尝试将 UHPFRC 材料应用到跨海大桥非通航孔工程, 希望借此促进桥梁工程的发展。

Table 3. Comparison of the basic mechanical properties between UHPFRC and conventional concrete

表 3. UHPFRC 与普通混凝土主要力学性能指标对比

对比指标	UHPFRC200	C50	UHPFRC200/C50
抗压强度(MPa)	170~230	50	约 4
抗折强度(MPa)	30~60	4	约 10
弹性模量(GPa)	50~60	34.5	约 1.6
断裂韧性(kJ/m ²)	20~40	0.12	约 200
徐变系数	0.29~0.31 (蒸汽养护)	1.3~2.1	约 1/5
氯离子扩散系数[10 ⁻¹⁴ /(m ² /s)]	22.17	200	约 1/10

5. 新型跨海大桥非通航孔桥型

5.1. 概念的提出

利用 UHPFRC 材料极高抗压和抗折强度、徐变小、出众耐久性能的特性, 笔者提出了一种新型组合箱梁形式: 单箱单室结构(图 2), 由 UHPFRC 腹板和底板、高强混凝土顶板组成, 整跨吊装施工、先简支后连续: 先施工 UHPFRC 腹板和底板形成薄壁槽型梁, 顶板现浇或分块预制, 再与槽型梁通过现浇段连接。采用体内预应力与体外预应力相结合的配筋方式, 设置纵向和横向预应力体系。适用跨径 80~120 m。

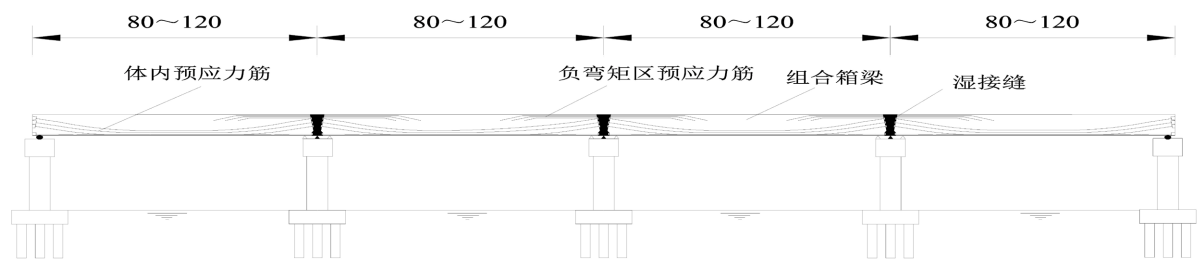


Figure 2. Schematic diagram of a new bridge type for non-navigable spans of the cross-sea bridge

图 2. 新型跨海大桥非通航孔桥型示意图

5.2. 主要受力特征

该组合箱梁采用超高抗压及抗折强度的 UHPFRC 取代常规混凝土腹板与底板, 能够显著减轻结构自重, 并充分发挥 UHPFRC 的材料特性; 直接承受车辆荷载作用的顶板则采用高强混凝土, 这样可以减少

车辆的振动影响和局部应力。当然, 如果箱梁各板件全部采用 UHPFRC 还可以进一步减轻结构自重, 这是文献[18]提供的方案构思, 文中指出该桥型可能存在活载应力幅过大、会引起疲劳问题, 此外众多的横隔板及体外预应力束的施工和布置可能存在一定难度, 同时还存在费用过高的问题。

5.3. 新型非通航孔桥型优点

将该组合箱梁应用于非通航孔, 具有以下优点:

(1) 自重轻。将传统混凝土箱梁的腹板与底板改用 UHPFRC 材料后, 板件厚度显著减小, 仅为原来的 1/3~1/2, 主梁自重可减轻 1/3~1/2, 有效地加大了组合梁桥的跨越能力。

(2) 对海洋环境影响小。跨径加大后可减少桥墩数量 40%左右, 不仅降低了工程造价, 也减小对海洋水流的影响。

(3) 无混凝土开裂风险。UHPFRC 材料的抗拉强度可达 30 MPa, 箱梁开裂风险极低。

(4) 徐变效应小、耐久性能好。由于采用 UHPFRC, 该组合梁具有上述优异性能。

由于具有上述显著优点, 本文提出的组合箱梁有望解决常规 PC 箱梁自重大、适用跨径小、耐久性能差以及钢-混组合结构养护困难、造价昂贵等棘手问题, 为跨海大桥非通航孔新桥梁结构形式提供了一种新的思路。

5.4. 与已有桥型的对比

(1) 与常规预应力混凝土箱梁的对比

常规 PC 箱梁是非通航孔最广泛采用的桥型, 但其存在三大固有缺陷: 自重大导致 60~70 m 跨径后经济性显著下降; 普通混凝土抗拉强度低, 裂缝问题频发, 在海洋环境下加速氯离子侵蚀; 徐变效应显著, 易造成结构长期下挠。本文组合箱梁用 UHPFRC 替代腹板和底板后, 板件厚度减至原来的 1/3~1/2, 主梁自重减轻 1/3~1/2, 100 m 跨径整跨自重仅 2600 t, 与 70 m PC 箱梁的 2100 t 相比, 单位长度自重反而更低。同时, UHPFRC 的抗拉强度可达 30 MPa 以上, 徐变系数仅为常规混凝土的 1/5 左右, 从根本上解决了开裂风险和长期下挠问题。

(2) 与钢-UHPC 组合桥面板的对比

钢-UHPC 组合桥面板(如港珠澳大桥采用)是在传统正交异性钢桥面板上铺设 UHPC 薄层以降低疲劳应力幅, 其主要目的为改善桥面系的疲劳性能, 而非替代主梁承重结构。与之不同, 本文提出的 UHPFRC 腹板与底板直接参与主梁的整体受力, 是结构承重体系的重要组成部分。此外, 本文采用闭合箱形截面, 抗扭刚度远大于钢-UHPC 组合桥面板所依附的开口钢箱梁, 对跨海大桥恶劣海洋环境下的横向稳定性和整体性具有天然优势。

(3) 与全 UHPC 箱梁的对比

邵旭东等提出的超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥在概念上具有创新性, 但其主要问题有三: 一是全部板件采用 UHPC 导致材料成本偏高; 二是可能存在的活载应力幅过大会引发疲劳问题; 三是众多横隔板及体外预应力束的施工和布置存在一定难度。本文采用 UHPFRC 腹板和底板、高强混凝土顶板的差异化组合策略, 直接承受车辆荷载的顶板采用 C60 混凝土, 既可减少车辆的振动影响和局部应力, 又能有效降低造价。这种差异化设计充分体现了“材尽其用”的结构优化理念。

(4) 与钢-UHPC 组合梁的对比

钢-UHPC 组合梁是近年来国内跨海桥梁领域的重要创新, 该结构自重较轻、吊运方便、造价较低。然而, 钢-UHPC 组合梁中钢梁部分在海洋环境下面临长期防腐问题, 后期养护成本高、涂装周期短。本文组合箱梁则无需考虑钢材腐蚀, 在海洋环境下具有天然耐久性优势, 后期养护工作量大幅降低。此外,

混凝土结构在长期刚度保持方面优于钢结构, 在控制长期变形方面更具优势。

5.5. 本研究的学术贡献和技术创新点

(1) 首次将 UHPFRC 与高强混凝土以差异化组合的形式应用于跨海大桥非通航孔箱梁, 系统提出了 UHPFRC 腹板/底板 + C60 顶板的组合箱梁构造方案。与现有 UHPFRC 组合结构研究主要集中在桥面铺装、加固改造或全 UHPC 整体箱梁不同, 本研究提出“差异化材料配置——承压区用高强混凝土(顶板)、受拉/抗剪区用 UHPFRC(腹板底板)”的结构设计理念, 基于不同结构部位的受力特征匹配具有相应优势的材料, 为该类组合结构的设计和工程应用提供了系统的技术方案。

(2) ① 结构方案创新: 提出了适用于跨海大桥非通航孔的组合箱梁新桥型, 采用先简支后连续的施工方法, 兼顾了工厂化预制质量可控与结构连续受力更优的双重优点。② 材料优化配置创新: 将 UHPFRC 用于结构受拉敏感区域(腹板和底板), 将高强混凝土用于受压面层(顶板), 实现了材料性能与结构需求的精准匹配。③ 设计方法探索: 结合国内外现行设计指南, 提出了适用于该组合箱梁的 UHPFRC 材料设计应力取值方法(抗压 80 MPa/抗拉 5 MPa), 并通过 4×100 m 试设计验证了方案的可行性。④ 工程适用性验证: 通过吊装吨位分析, 验证了利用国内现有大型浮吊设备进行整跨吊装的施工可行性, 并证明了该桥型在经济性指标上优于常规 PC 箱梁和组合钢箱梁。

6. 4×100 m 先简支后连续箱梁桥试设计

6.1. 结构设计

结构布置: 全长 $4 \times 100 = 400$ m, 等截面箱梁, 腹板与底板采用 UHPFRC200, 顶板则为 C60 混凝土, 梁与梁之间现浇湿接缝长度为 1.2 m。每跨除两端的端横隔梁外, 在跨中每隔 20 m 设置一道中横隔板, 共 4 道。桥面宽度: 净 15 m (车道) + 2×0.5 m (防撞栏杆) = 16 m。设计荷载为公路 I 级。

截面布置: 箱梁高 5.0 m, 跨中截面腹板厚 18 cm、底板厚 20 cm, 顶板桥厚 28 cm; 支点截面腹板厚 40 cm、底板厚 35 cm, 顶板厚 45 cm, 如图 3 所示。

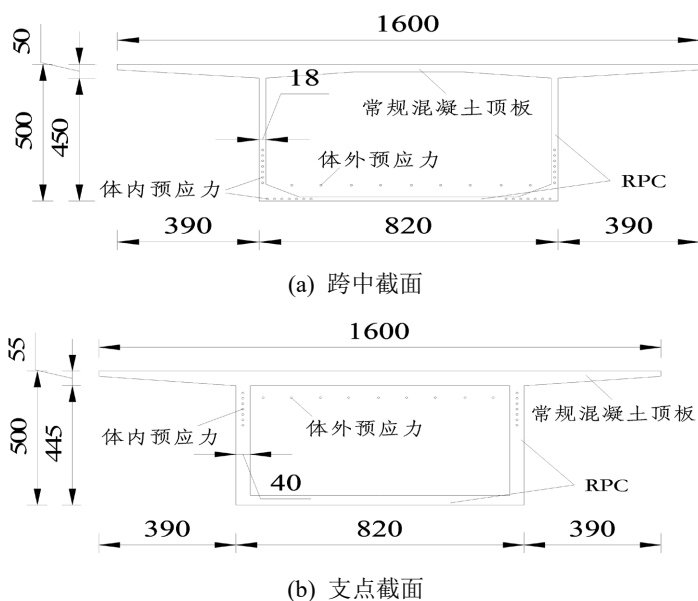


Figure 3. Cross-sections of main girder (Unit: cm)

图 3. 主梁横断面图(单位: cm)

预应力布置: 纵向预应力束采用直径 15.24 mm、抗拉强度 1860 MPa 的低松弛钢绞线, 其中底板束、腹板束规格为 7 孔, 体外束规格为 15 孔, 湿接缝处顶板束为 12 孔。每跨张拉 30 束底板短束、4 束底板通长束、18 束腹板束、10 束体外束, 1、2 跨与 3、4 跨间湿接缝处张拉 8 束顶板束, 2、3 跨间湿接缝处张拉 6 束顶板束。

其余: 桥面铺装采用 8 cm 防水混凝土 + 10 cm 沥青混凝土, 整体升降温按 +25° 与 -20° 考虑, 支座沉降按隔墩 10 mm 考虑, 日照温差按规范选取。

施工方法: ① 下部结构施工, 同时预制槽型梁; ② 形成组合截面, 张拉体外及部分体内预应力钢束; ③ 安装临时支座, 组合箱梁整体吊装; ④ 安装永久支座, 现浇相邻跨湿接缝; ⑤ 张拉现浇段预应力并完成体系转化; ⑥ 完成桥面铺装及附属设施施工。

6.2. UHPFRC 材料设计应力取值

国外规范[19]、设计指导[20]给出的 UHPFRC 应力水平推荐值如表 4 所示。

Table 4. Stress level of UHPFRC

表 4. UHPFRC 应力水平

材料应力指标	法国 AFGC 规范[19]	澳大利亚 VSL 公司设计指导[20]	Ductal® [19] BSI® [19]
抗压强度	推荐公式: $f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$ 其中 f_{cd} 为抗压强度设计值; f_{ck} 为抗压强度特征值; α_{cc} 为考虑不利荷载及荷载长期效应影响的折减系数, 取 0.85; γ_c 为材料分项系数, 取 1.5。 推荐特征值取 150 MPa, 设计值取 85 MPa。	推荐公式: $f'_c = f_m - 2.33sd$ 其中 f'_c 为材料抗压强度特征值; f_m 为试验测得抗压强度平均值; sd 为试验数据标准差。	推荐特征值 取 200 MPa 推荐特征值取 180 MPa
抗拉强度	推荐特征值取 9 MPa	推荐设计值取 5 MPa	推荐特征值 取 9 MPa 推荐特征值取 9.1 MPa

注: 法国、Ductal、BSI 未给出抗拉强度设计值具体大小, 若按照抗压强度特征值与设计值换算公式计算, 可得其抗拉强度设计值为 5.1 MPa, 与 VSL 公司设计指导中的 5 MPa 相差不大。

由表 4 可知, 各规范及设计指南所规定的设计应力限值大同小异, 本文综合比较后、并根据试验结果, 取 UHPFRC 材料的抗压、抗拉强度设计应力分别取 80 MPa 与 5 MPa。

6.3. 计算结果分析

这样, 采用桥梁专业程序 TDV 进行结构分析, 结果如下。

6.3.1. 槽型梁

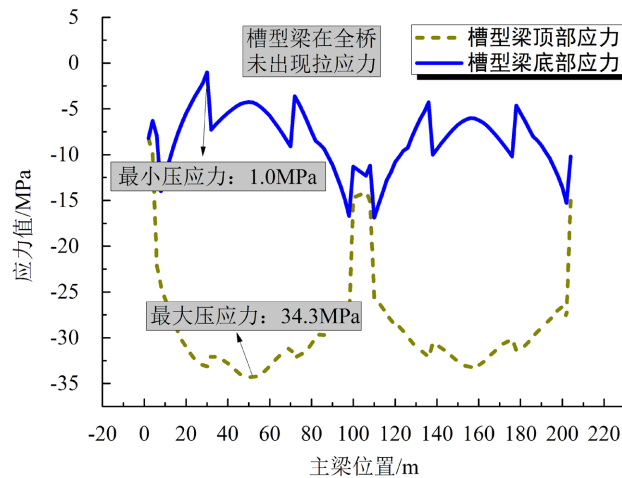
槽型梁在施工阶段的最大压应力为 49.7 MPa, 最大拉应力为 4.8 MPa, 满足要求。

图 4(a)为槽型梁(半桥)的短期荷载效应组合应力, 可知其最小压应力为 1.0 MPa, 最大压应力 34.3 MPa, 未出现拉应力, 满足要求。

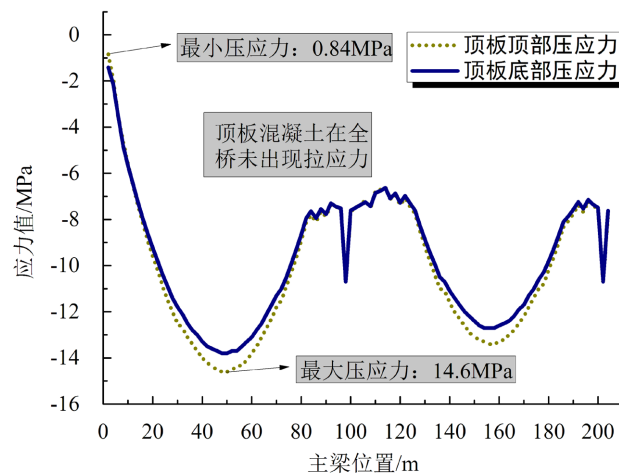
6.3.2. 顶板

混凝土顶板在施工阶段的最大压应力为 15.0 MPa, 没有出现拉应力, 满足要求。

图 4(b)为混凝土顶板(半桥)的短期荷载效应组合应力, 最大压应力 14.6 MPa, 未出现拉应力, 满足 C60 混凝土的应力要求。



(a) 短期效应组合槽型梁应力值(半桥)



(b) 短期效应组合顶板应力值(半桥)

Figure 4. Stress values of the main beam under combination for short-term action effects (Unit: MPa)**图 4.** 短期效应组合主梁应力值(单位: MPa)

6.3.3. 变形

在汽车荷载作用下, 考虑长期效应的主梁最大挠度为 $38.07 \text{ mm} < L/600 = 166.67 \text{ mm}$, 满足要求。

6.4. 耐久性评估

本文提出的组合梁, UHPFRC 材料仅在施工过程中出现了较小的拉应力, 在组合状态下没有出现拉应力。当然, 在不可预见的情况下, 结构出现拉应力时, 其耐久性必须受到重视, 这将影响到结构的使用寿命。国内外许多学者对 UHPFRC 的耐久性进行了研究。

德国卡尔斯鲁厄大学的 G. Herold 等[21]通过气体吸附法和压汞法研究了 UHPFRC 的孔隙体积和孔隙半径分布。试验表明, 在常温状态下, 用气体吸附测量法测得其最大孔隙半径为 10 nm , 而在加热养护条件下, 其孔隙半径会减小至 1.5 nm 甚至更小。

密歇根技术大学的 M. Ahlorn Theresa 等[22]将经过高温养护及空气养护的 UHPFRC 试件置于 60 V 电压环境中进行氯离子穿透试验。试验结果表明, 6 小时后, 其氯离子穿透量均低于 75 库伦, 作者认为

该试件几乎不渗透。且经过高温养护的试件氯离子穿透率低于经过空气养护试件的氯离子穿透率。

德国卡尔斯鲁厄大学的 C. Scheydt Jennifer 等[23]将 UHPFRC 试件浸入 3%的 NaCl 溶液中并持续几个月, 记录氯离子与试件的相互作用, 结果显示 UHPFRC 耐久性能相当卓越。

德国卡尔斯鲁厄大学的 Rafiee Alireza 与 Schmidt Michael [24]建立了预测 UHPFRC 结构中腐蚀电流与钢筋截面损耗的模型, 并通过试验结果证明了其模型的准确性, 其结果显示: 当试块的保护层厚度为 10 mm、20 mm 与 30 mm 时, 截面损耗率分别为 4.5%、4%与 1.4%, 其抗氯离子腐蚀性能卓越。

国内而言, 施惠生等[25]参照 ASTM C1202-97 标准对掺矿渣活性粉末混凝土抗氯离子渗透性进行了研究, 各组试件的通电量均小于 30 C, 可以视为不渗透。

UHPFRC 的抗拉应力水平很高, 在使用过程中一般不会出现裂缝, 即使出现裂缝, 已有的试验研究结果表明, 该材料具有极高的耐久性, 不会对其正常使用产生影响。

6.5. 吊装吨位比较

本组合梁的整跨重量为 2600 吨, 国内是否有足够吊装能力的大型浮吊, 本文调查结果如表 5 所示。

Table 5. List of heavy floating crane equipment in China

表 5. 国内大型浮吊设备一览表

船机名称	起吊重量/t	吊高/m	船型	吃水深度/m
天一号	3000	53	运架一体船	3.5
四航奋进号	2600	93	固定臂架	4.8

由表 5 可得, 天一号与四航奋进号均可起吊本组合箱梁(自重 2600 t), 且天一号浮吊船的起吊重量为 3000 t, 较本文组合梁的 2600 t 有较大富余, 因此可以满足要求, 甚至还可以单跨跨径, 以带来更大的经济效应。

6.6. 经济性比较

将本文 100 m 跨组合箱梁桥与东海大桥 70 m PC 箱梁以及上海长江大桥 105 m 组合钢箱梁的上部结构工程量进行对比, 见表 6。

由表 6 可得, 与 70 m PC 箱梁桥相比, 本文组合箱梁每平米混凝土与 UHPFRC 用量为 0.6 m³, 较其 0.73 m³ 减少 18%, 钢绞线用量每平米 40.4 kg, 减少 32.6%。且考虑到跨径增加 30%, 本文组合箱梁能节省可观的下部结构工程量。

105 m 组合钢箱梁每平米混凝土用量为 0.35 m³, 较本文组合箱梁节省 42%, 但其每平米多出 360 kg 钢材用量, 且钢材价格较昂贵。

此外, 由于 UHPFRC 优异的力学性能, 可利用其高弯曲抗拉强度代替部分受力钢筋, 甚至不再配置箍筋, 因而能够显著减少普通钢筋用量, 减少材料成本和总造价, 该项数据从表 6 中可以直观看出。

Table 6. Comparison of three bridge superstructures in economic indicator

表 6. 三种桥型上部结构经济指标对比

项目	本文组合箱梁(100 m)		70 m PC 箱梁		105 m 组合钢箱梁	
	全桥	每平米	全桥	每平米	全桥	每平米
桥宽/m	16		15.8		17.15	
混凝土/m ³	608.35	0.38	807.69	0.73	635.96	0.35

续表

预应力筋/kg	64,560	40.4	66,360	60.0	—	—
普通钢筋/kg	73,000	45.6	210,000	190.0	152,640	85.0
钢材/kg	—	—	—	—	646,470	360
UHPFRC/m ³	345.99	0.22	—	—	—	—
吊装重量/t	2600		2100		2300	

由上可知, 本文组合箱梁与现有跨海大桥非通航孔桥型相比, 具有良好的经济性。

6.7. 长期效应的影响

为全面评估本文提出的新型组合箱梁在长期服役过程中的受力性能和变形形态, 本节在原有短期效应组合分析的基础上, 补充考虑混凝土收缩徐变等长期效应的结构分析。UHPFRC 材料具有极低的徐变特性, 其徐变系数仅为 0.29~0.31 (蒸汽养护条件下), 约为常规混凝土的 1/5。然而, 在组合结构中, UHPFRC 腹板/底板与高强混凝土顶板的收缩徐变特性存在差异, 这种差异将在长期服役过程中引起内部应力重分布, 因此有必要进行定量分析。

采用 TDV 桥梁专业程序对 4 × 100 m 先简支后连续组合箱梁桥进行长期效应分析。主梁考虑收缩徐变效应后, 结构在各阶段(成桥时、竣工 3 年、竣工 10 年、竣工 30 年和竣工 100 年)的应力分布状态。

(1) 成桥阶段恒载和预应力引起的上拱度最大值为+12.5 mm (跨中向上), 这是预应力张拉后结构产生的正常反拱。

(2) 竣工后 3 年内, 随着混凝土收缩徐变的发生, 预应力损失逐步显现, 跨中上拱度从+12.5 mm 逐渐减小至约+6.8 mm。此阶段变形变化速率较快, 与收缩徐变前期发展特征一致。

(3) 竣工后 3~10 年间, 变形变化速率明显减缓, 跨中挠度进一步降至约+2.1 mm。此阶段 UHPFRC 与 C60 混凝土之间的应力重分布进程也基本同步趋于稳定。

(4) 竣工后 30 年时, 跨中挠度趋于稳定, 约为-1.2 mm (跨中产生极小下挠)。竣工 100 年后, 跨中最终挠度为-1.5 mm。与常规 PC 箱梁桥常见的数厘米甚至更大的长期下挠相比, 本文组合箱梁的长期下挠值极小(仅为跨径 L/66667), 这主要得益于 UHPFRC 极低的徐变特性和高抗裂能力对预应力损失的抑制。

(5) 在汽车荷载(考虑长期效应组合)作用下, 主梁最大挠度为 38.07 mm, 小于规范限值 L/600 = 166.67 mm, 满足要求。由于 UHPFRC 部分未出现拉应力, 无需考虑裂缝开展对结构刚度的影响, 因此长期挠度与短期效应组合下的挠度相差不大, 结构刚度始终保持稳定。

综合上述分析, 本文提出的 UHPFRC 腹板/底板 + C60 顶板组合箱梁在长期服役过程中的受力性能和变形形态表现出以下显著特征: (1) 得益于 UHPFRC 极低的徐变系数(仅 0.29~0.31), 全截面在 100 年服役期内始终保持全截面受压状态, UHPFRC 最大压应力仅为抗压设计强度的 48%。这意味着氯离子侵蚀的主要通道——裂缝——在结构正常使用期间完全不存在, 结合 UHPFRC 本身极低的氯离子扩散系数, 结构的耐久性能得到了根本保障。(2) 组合结构中 UHPFRC 与 C60 混凝土徐变特性的差异引起了内部应力重分布, 但这种重分布过程较为平稳, UHPFRC 压应力增幅约 13%, 顶板压应力降幅约 26%, 均在安全范围以内。(3) 长期变形极小, 跨中 100 年最终挠度仅约-1.5 mm, 远小于常规 PC 箱梁桥数厘米甚至更大的长期下挠量。这从结构层面验证了本桥型在控制长期使用性能方面的显著优势, 也体现了采用 UHPFRC 替代常规混凝土腹板和底板对改善结构耐久性和长期性能的实质性贡献。

7. 结论及应用前景展望

(1) 本文提出了一种针对跨海大桥非通航孔的新桥型。该组合箱梁由 UHPFRC 腹板与底板、高强混

混凝土顶板组成, 具有自重轻、跨度大、有效降低混凝土开裂风险、收缩徐变效应小、耐久性能好等优点。

(2) 该桥型跨度大, 能够大幅减小下部结构工程量, 降低工程造价, 减小对海洋水流的影响。

(3) 通过对此桥型进行试设计表明: 在施工阶段与正常使用阶段, 主梁应力均小于材料容许应力值, 汽车荷载作用下的主梁挠度值满足要求, 并且将该组合箱梁的工程量与预应力混凝土箱梁、组合钢箱梁的工程量进行对比, 说明其具有良好的经济性。

(4) 该组合箱梁可以采用现有浮吊设备进行架设, 具有施工可行性。

本文所提出的组合箱梁有着诸多优点, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 王仁贵. 杭州湾跨海大桥总体设计[J]. 公路, 2009(5): 11-18.
- [2] 郭健. 跨海大桥建设的主要技术现状与面临的挑战[J]. 桥梁建设, 2010(6): 66-69.
- [3] 林元培, 章曾焕, 卢永成, 等. 上海东海大桥工程总体设计[J]. 城市道桥与防洪, 2004(4): 1-8, 150.
- [4] 王晨阳. 跨海大桥对水动力环境影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [5] 王国亮, 谢峻, 傅宇方. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 52-56.
- [6] 楼庄鸿. 大跨径梁式桥的主要病害[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 84-87.
- [7] 聂建国, 樊健生. 国内钢-混凝土组合梁的研究及其应用综述[J]. 工程力学(增刊), 2001(A01): 182-190.
- [8] 项海帆. 世界大桥的未来发展趋势-2011 年伦敦国际桥协会议的启示[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 第二十届全国桥梁学术会议论文. 北京: 人民交通出版社, 2012: 10-17.
- [9] 方志, 杨剑. FRP 和 RPC 在土木工程中的研究与应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(4): 54-61.
- [10] Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995) Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [11] Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G. (1996) Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes. *Materials and Structures*, **29**, 233-240. <https://doi.org/10.1007/bf02485945>
- [12] Bonneau, O. and Pouhn, C. (1996) Reactive Powder Concrete: From Theory to Practice. *Concrete International*, **18**, 47-49.
- [13] Chan, Y. and Chu, S. (2004) Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete. *Cement and Concrete Research*, **34**, 1167-1172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>
- [14] Yu, R., Spiesz, P. and Brouwers, H.J.H. (2014) Mix Design and Properties Assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, **56**, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>
- [15] Hassan, A.M.T., Jones, S.W. and Mahmud, G.H. (2012) Experimental Test Methods to Determine the Uniaxial Tensile and Compressive Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, **37**, 874-882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>
- [16] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [17] 曹万会, 高淑. RPC 混凝土在铁路预应力 T 形梁中的应用试验[J]. 铁道建筑技术, 2009(7): 105-108.
- [18] 邵旭东, 詹豪, 雷薇, 等. 超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥概念设计与初步实验[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 83-89.
- [19] AFGC (2002) Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances. Recommandations Provisoires, Association Française de Génie Civil.
- [20] Gowripalan, N. and Gilbert, R.I. (2000) Design Guidelines for Ductal® Prestressed Concrete Beams. Design Guide, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- [21] Herold, G. and Müller, H.S. (2004) Measurement of Porosity of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete. *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2004, Kassel, 685-694.
- [22] Ahlborn Theresa, M., Misson Donald, L.I., Peuse Erron, J., et al. (2008) Durability and Strength Characterization of Ultra-High Performance Concrete under Variable Curing Regimes. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2008, Kassel, 197-204.
- [23] Scheydt Jennifer, C., Gunther, H. and Müller Harald, S. (2008) Long Term Behaviour of Ultra High Performance Concrete

- under the Attack of Chlorides and Aggressive Waters. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 2008, Kassel, 231-239.
- [24] Alireza, R. and Michael, S. (2012) Computer Modeling and Investigation on the Chloride Induced Steel Corrosion in Cracked UHPC. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press GmbH, 231-239.
- [25] 施惠生, 施韬, 陈宝春, 等. 掺矿渣活性粉末混凝土的抗氯离子渗透性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 93-96.