

# 超高性能钢壳混凝土连续刚构桥 概念设计与可行性

刘世明<sup>1,2</sup>, 张威<sup>2</sup>, 马印平<sup>3</sup>, 刘永健<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室, 郑州 450045; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 郑州 450045; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**以钢壳内填超高性能混凝土(UHPC)并设置开孔钢板连接件(PBL)加劲肋为基本构成单元,提出了一种新型超大跨径连续刚构桥——超高性能钢壳混凝土(UHP-SSC)箱梁连续刚构桥。UHP-SSC箱梁采用UHPC受压、钢壳受拉,可作为UHPC浇筑免拆模板,能够充分发挥钢材与UHPC轻质高强的特性。对主跨400 m级UHP-SSC箱梁连续刚构桥开展概念设计研究,结果表明:新型UHP-SSC箱梁的顶板、底板和腹板厚度均显著减薄。新型连续刚构桥的合理边中跨比为0.5~0.65,桥墩处和跨中的合理梁高比为2.59~3.59,桥墩处梁高应占主跨跨径的1/26~1/32。该新型箱梁的强度及刚度都满足规范中关于预应力混凝土主梁的受力要求。对比同等跨径的混合梁连续刚构桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥,UHP-SSC连续刚构桥上部结构自质量分别减少了约132.8%、76.8%、324.4%和338.3%,碳排放量分别降低了约28.5%、57.1%、14.1%和55.7%。新型UHP-SSC连续刚构桥的上部结构造价与混合梁连续刚构桥、拱桥相比分别提高约3.1%、1.3%,与斜拉桥、悬索桥相比分别降低约26%、46.1%。新型UHP-SSC连续刚构桥具有显著的结构轻量化特征和优越的经济、环保性能,在大跨径梁桥方面具有极强的竞争力和较好的工程推广应用前景。

**关键词:**桥梁工程;箱梁;超高性能钢壳混凝土;连续刚构桥;概念设计

**中图分类号:**U448.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3242-11

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240089

## Conceptual design and feasibility of ultra-high-performance steel-shelled concrete continuous rigid-frame bridge

LIU Shi-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, MA Yin-ping<sup>3</sup>, LIU Yong-jian<sup>3</sup>

(1. International Joint Research Lab for Eco-building Materials and Engineering of Henan, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**收稿日期:**2024-01-23.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51508189);重庆市在渝院士牵头科技创新引导专项项目(CSTB2023YSZX-JSX0004);河南省科技攻关项目(232102321079, 232102321080);河南省自然科学基金项目(252300420048);河南省教育厅科学技术重点研究项目(26B560009)

**作者简介:**刘世明(1980-),男,副教授,博士.研究方向:钢桥与组合结构桥梁.E-mail: liushm@ncwu.edu.cn

**通信作者:**刘永健(1966-),男,教授,博士.研究方向:钢桥与组合结构桥梁.E-mail: liuyongjian@chd.edu.cn

**Abstract:** In this paper, a novel type of super-long-span continuous rigid-frame bridge was presented, ultra-high-performance steel-shelled concrete(UHP-SSC) continuous rigid-frame bridge with box girder, with steel shell filled with ultra-high-performance-concrete(UHPC) and perfbond leiste stiffeners(PBL) as fundamental components unit. UHP-SSC box girder employed UHPC to bear pressure, and steel shells bear tension, which may be used as the UHPC pouring non-removable formwork, allowing the light self-weight and high strength properties of steel and UHPC to be completely exploited. Conceptual design of the 400-meter-long continuous rigid-frame bridge with UHP-SSC box girder was studied, the results indicated that the thickness of top plate, bottom plate, and web plate of the UHP-SSC box girder can be greatly lowered. The suitable side-to-mid span ratio new continuous rigid-frame bridge is 0.5~0.65, and the reasonable beam height ratio of the pier and midspan is 2.59~3.59, and the height of box girder at the pier accounts for 1/26~1/32 of the main span. The strength and stiffness of the new box girder meet the mechanical requirements of the code for fully prestressed concrete structure. The superstructure weight per square meter of UHP-SSC continuous rigid-frame bridge is reduced by approximately 132.8%, 76.8%, 324.4% and 338.3% respectively, when compared to mixed beam continuous rigid-frame bridge, arch bridge, cable-stayed bridge, and suspension bridge with similar span, and the carbon emissions are also reduced by about 28.5%, 57.1%, 14.1% and 55.7%. The superstructure cost of the new UHP-SSC continuous rigid frame bridge is increased by about 3.1% and 1.3% respectively, when compared to the mixed beam continuous rigid-frame bridge and arch bridge, and decreased by about 26% and 46.1% respectively, when compared to the cable-stayed bridge and suspension bridge. The new UHP-SSC continuous rigid-frame bridge has evident structural light self-weight properties, better economic and environmental performance, and has strong competitiveness in long-span beam bridges, as well as excellent technical popularization and application possibilities.

**Key words:** bridge engineering; box girder; ultra-high-performance steel-shelled concrete; continuous rigid-frame bridge; conceptual design

## 0 引言

预应力混凝土(Prestressed concrete, PC)连续刚构桥具有构造简单、施工便捷<sup>[1,2]</sup>、经济性好、抗震性能优越<sup>[3-5]</sup>等显著优势,广泛应用于桥墩较高且主跨在 100~300 m 的桥梁。为进一步提高 PC 连续刚构桥的跨越能力,桥梁设计者提出两种思路:①墩顶附近的主梁采用空腹式结构<sup>[6]</sup>,据此建成了甘溪特大桥(主跨 300 m)和六枝特大桥(主跨 320 m);②主跨采用轻骨料混凝土梁或钢混混合梁以减轻上部结构自质量<sup>[7-9]</sup>。其中,挪威采用轻骨料混凝土主梁,建成了 Stolmasunder 桥(主跨 301 m)和 Raftsundet 桥(主跨 298 m);我国采用钢混混合梁设计,建成了重庆石板坡复线桥(主跨 330 m)和山东套尔河特大桥(主跨 338 m)。然而,PC 连续刚构桥受普通混凝土徐变系数大、抗拉强度低的制约,主跨跨中下挠过大<sup>[10]</sup>、主梁腹板混凝土开裂<sup>[11]</sup>、空腹式主梁施工工艺复杂等问题突出。钢混混合梁连续刚构桥受运输和吊装

条件限制较大,如石板坡复线桥需采用吊重 1 400 t 的大型吊装设备。

目前,世界最大跨径钢箱梁桥为巴西里约-尼泰罗伊大桥(主跨 300 m),我国最大跨径钢箱梁桥为引江济淮工程 G312 合六叶公路桥(主跨 180 m)。若钢箱梁跨径过大,需增厚钢箱梁板材,这会导致焊接难度增大、加工制造困难和后期养护工作量增大,同时存在桥面铺装易损坏且初始投资偏高的问题<sup>[12]</sup>。

超高性能混凝土(Ultra-high-performance concrete, UHPC)是一种承压效率有望超越钢材的轻质高强材料<sup>[13-15]</sup>。邵旭东等<sup>[16-18]</sup>对主跨 400 m 级连续箱梁桥开展试设计研究,提出特大跨径 UHPC 连续箱梁的建议构造尺寸,并进行了技术经济性分析。贾丽君等<sup>[19]</sup>以苏通大桥辅航道桥为工程背景,采用 UHPC 主梁替代 PC 主梁,结构自质量减轻 43%,抗弯承载力提高 80% 以上,优化后的结构使用寿命更长、养护费用更低、经济效

益显著。UHPC 制备过程中需要高温蒸养以改善收缩性能<sup>[20,21]</sup>,这使得 UHPC 现场浇筑的施工管理和质量控制难度较大。UHPC 桥面板与钢主梁联合受力的相关研究表明,UHPC 能与钢结构实现可靠传力<sup>[22,23]</sup>,充分发挥钢结构受拉、UH-PC 受压的性能优势。

为解决大跨径连续刚构桥存在的以上技术难题,刘永健等<sup>[24]</sup>提出超高性能钢壳混凝土(Ultra-high-performance steel-shelled concrete, UHP-SSC)连续刚构桥:在钢壳内填充 UHPC 并布置开孔钢板(Perfobond leiste, PBL)加劲肋,钢壳既作为 UHPC 浇筑的模板,又代替 UHPC 内的普通钢筋和部分预应力钢筋,大幅提升钢材承载效率。PBL 加劲肋通过钢板开孔形成混凝土“榫”,具有加劲、抗剪、抗拔等多重功效。内填的 UHPC 以受压为主,可提高钢壳局部刚度;钢壳内壁布置的 PBL 加劲肋相较于钢主梁加劲构造大幅简化,能有效减小剪力滞和畸变效应。

本文以 400 m 级特大跨径连续刚构桥为研究对象,对 UHP-SSC 连续刚构桥进行概念设计和可行性研究,总结箱形截面单元拆分方法、构造参数取值范围和施工方案,并开展技术经济性分析,旨在为 UHP-SSC 连续刚构桥的工程应用提供理论支撑。

## 1 特大跨径 UHP-SSC 连续刚构桥概念设计

特大跨径 UHP-SSC 连续刚构桥是一种结构构造介于 PC 连续刚构桥和钢结构连续刚构桥之间的桥梁,其主梁采用箱形截面,具有以下技术特征:

(1)超高力学性能。当采用抗压强度为 120 MPa 的 UHPC(UC120)时,其受压强重比(材料轴向受压强度与容重的比值)可分别达到 C50 混凝土、Q355 钢材的 3.70 倍、1.13 倍,结构承载潜力巨大。UHPC 作为主要承压材料,与钢壳有机结合,可使结构更轻、承载效率更高。此外,UHPC 的长期徐变系数约为普通混凝土的 20%<sup>[25]</sup>,通过外部钢壳协同承压,有助于减小徐变变形,一定程度上解决了 PC 大跨径连续刚构桥主梁跨中下挠的技术顽疾。钢壳作为 UHPC 浇筑过程中的免拆模板,承担拉力以提高结构延性,并协助预应力钢筋受拉,进一步提升结构整体刚度。UH-

PC 受到外部钢壳“套箍”约束,可提高局部承压能力和锚固性能,便于预应力钢筋锚固。UHP-SSC 箱梁的应力幅远低于对应的钢箱梁和 UH-PC 箱梁,抗疲劳性能更强。

(2)超强施工性能。通过标准化预制各组成单元,可实现商品化、工业化和装配化生产,既能保证施工质量,又能降低工程造价;各单元间通过焊接或螺栓连接,施工精度、效率大幅提高,可达到与钢结构桥梁相当的施工效率,大幅缩短工期。同时,预制节段质量降低,可以增大节段长度或减少吊装设备吨位。

(3)构造简单、养护方便和耐久性好。首先,标准 T 形(见图 1(a))、L 形杆单元(见图 1(b))和外部加劲(见图 1(c))、外部不加劲板单元(见图 1(d))在预制场加工制作,通过焊接、H 型钢连接或螺栓拼接,可以灵活组成各种 UHP-SSC 箱形截面,如图 2 所示。其中,板单元厚度包括 80、100、120 mm 等多种类型,钢壳壁厚包括 6、8、10 mm 等规格;采用 PBL 内部加劲肋,构造简单,涂装面积小,养护成本低;顶板 UHPC 加劲处用于布置纵向预应力钢筋。其次,根据箱梁构造和受力需

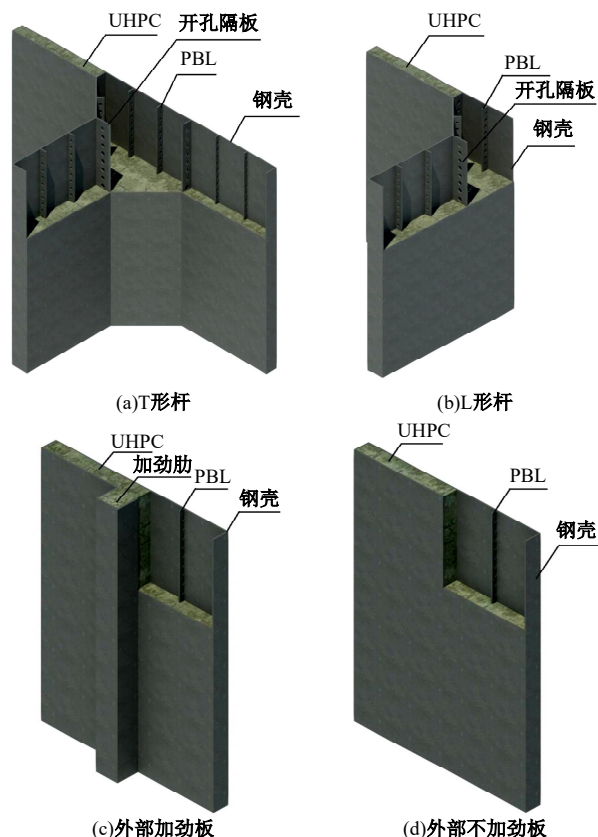


图 1 UHP-SSC 箱形截面基本组成单元

Fig. 1 Basic component unit of UHP-SSC box section

要,选取相应标准杆、板单元,拼装成等截面或变截面 UHP-SSC 箱梁。此外,钢壳形成密闭空间,即便 UHPC 出现微裂缝仍可以继续工作,耐久性好。

(4)现存挑战。UHPC 过大的收缩会增加钢壳内 UHPC 脱黏、脱空的风险,进而影响钢壁板和 UHPC 的协同受力。此外,UHP-SSC 箱梁截面的剪力滞效应明显,对结构整体受力不利。

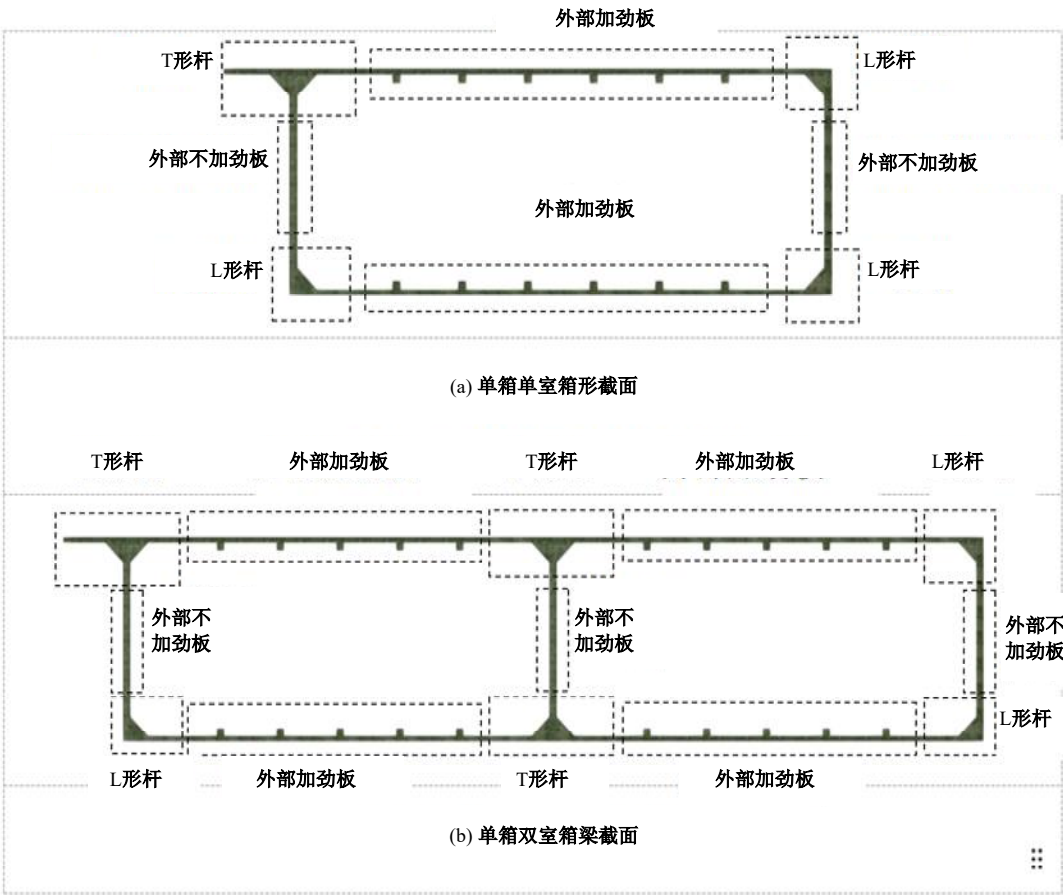


图 2 UHP-SSC 箱形截面构造

Fig. 2 Box section structure of UHP-SSC

2 主跨 400 m 级的 UHP-SSC 连续刚构桥试设计

2.1 总体设计流程和有限元模型

2.1.1 设计流程

UHP-SSC 箱梁的边中跨比值、梁高、顶底板及腹板厚度等关键参数设计流程如图 3 所示。

2.1.2 设计参数

拟设计桥梁位于设计时速 120 km/h 的高速公路上,是一座主跨跨径为 400 m 的变截面连续刚构桥,主墩高 80 m,主梁采用 UHP-SSC 箱形

截面。桥梁设计荷载为公路-I 级,桥面采用上、下行分离式双向六车道布置,单幅桥宽 16 m。

设计相关参数取值如下:①UHPC 的材料特性参照规程<sup>[26]</sup>,具体如表 1 所示,主梁钢结构采用 Q355 钢材,钢壳及 PBL 加劲肋的厚度均为 8 mm;②桥面铺装等二期恒载以 44.2 kN/m 的线荷载形式施加在主梁上,横隔梁质量以节点荷载施加;③考虑整体升温、降温 25 ℃;④设计车道为双幅六车道,单幅三车道,汽车荷载为公路-I 级荷载。

表 1 UHPC 材料特性

Table 1 Material properties of UHPC

| 强度等级  | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 线膨胀系数                | 徐变系数 | 容重/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 轴向抗压强度/MPa |          |          | 轴向抗拉强度/MPa |          |
|-------|----------|-----|----------------------|------|--------------------------|------------|----------|----------|------------|----------|
|       |          |     |                      |      |                          | $f_{cu,k}$ | $f_{ck}$ | $f_{cd}$ | $f_{tk}$   | $f_{td}$ |
| UC120 | 45.0     | 0.2 | $1.1 \times 10^{-5}$ | 0.2  | 25                       | 120        | 84       | 57.5     | 5.8        | 4        |

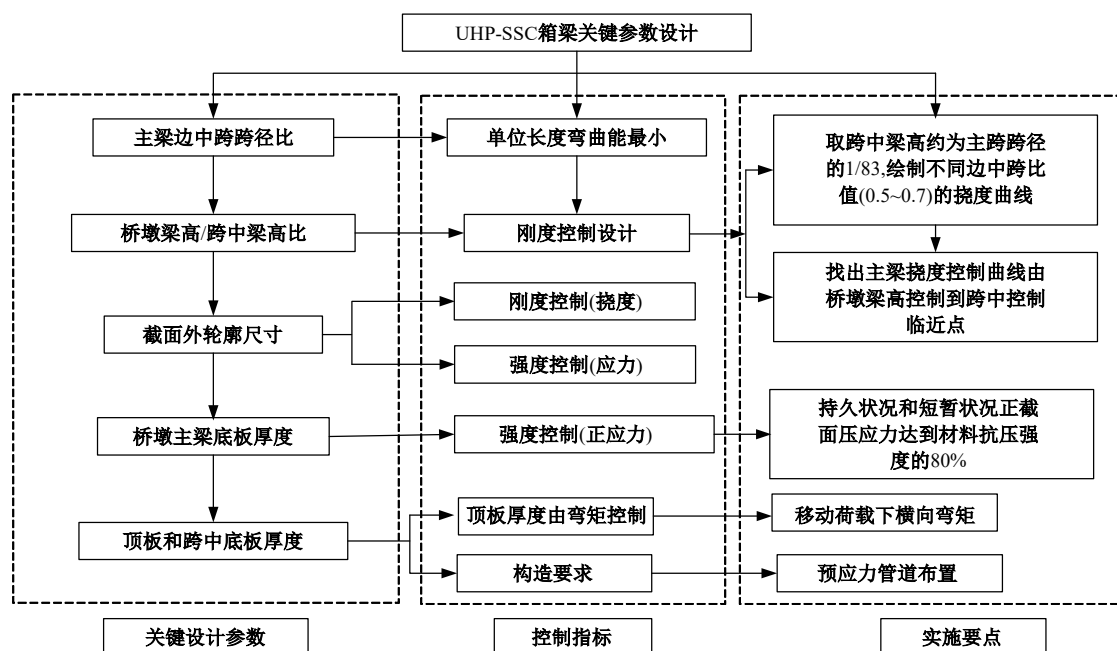


图3 UHP-SSC箱梁关键参数设计流程

Fig. 3 Design process of key parameters of UHP-SSC box girder

### 2.1.3 有限元模型

采用Midas Civil建立试设计UHP-SSC连续刚构桥的有限元分析模型,模型共划分1446个单元、493个节点,均采用梁单元模拟。其中,相邻节点的UHP-SSC箱梁均采用内钢壳、外钢壳与UHPC三单元重叠的梁单元模拟,内钢壳、外钢壳及PBL加劲肋厚度均为8 mm,UHPC厚度由箱梁顶板、底板和腹板厚度减去内外钢壳厚度确定。重叠单元属性由3个单元根据变形协调原理叠加计算得出。箱梁共分为73个节段,边跨和中跨合龙段长度均为4 m,标准节段长度为12 m,边跨桥台处节段长度为14 m。该桥采用预制箱梁节段悬臂拼装法施工,共分为70个施工阶段。预应力钢束类型包括腹板束F1~F31(M15-23)、顶板束T1~T41(M15-19和M15-23)、中跨底板束ZB1~ZB10(M15-19和M15-32)、边跨底板束BB1~BB6(M15-19和M15-30),共344根。主墩墩底采用固结约束,墩梁结合处采用主从约束的刚性连接模拟,桥台处支座采用只受压节点弹簧模拟。UHP-SSC连续刚构桥有限元模型如图4



图4 UHP-SSC连续刚构桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of UHP-SSC continuous rigid-frame bridge

所示。

### 2.2 主梁构造

#### 2.2.1 边跨比设计参数

根据主跨跨径为400 m的设计条件,选取边中跨比分别为0.5、0.525、0.55、0.575、0.6、0.625、0.65、0.675和0.7。在线弹性范围内,作用于主梁上的外力做功大小可以用梁内蓄积的弯曲应变能描述。恒载作用下主梁单位长度弯曲应变能<sup>[17]</sup>与边中跨比的变化关系如图5所示。

由图5可知,当边中跨比为0.575时,主梁单位长度应变能最小,因此本文边跨按230 m设计。

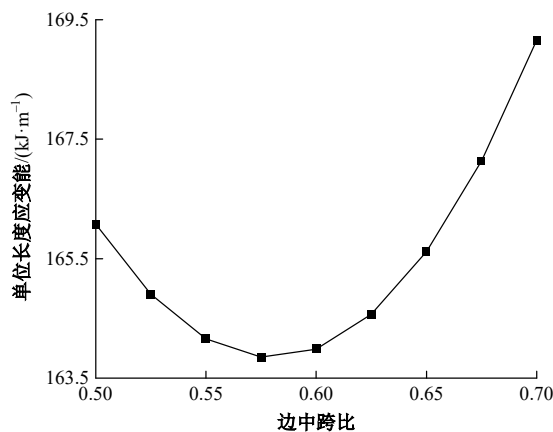


图5 UHP-SSC箱梁边中跨比与单位长度应变能关系

Fig. 5 Relationship between UHP-SSC box girder's side-to-mid span ratio and strain energy per unit length

综合分析,建议 UHP-SSC 箱梁连续刚构桥的边中跨比控制在 0.50~0.65 为宜。

### 2.2.2 梁高比设计参数

根据现有设计经验和初步试算,跨中梁高采用 4.8 m,桥墩处梁高取 8~25 m,对应的桥墩梁高与跨中梁高比为 1.67~5.21。不考虑预应力钢筋的影响,按《公路桥涵设计通用规范》方法提取汽车作用频遇值下最大竖向挠度与对应各梁高比的关系曲线,如图 6 所示。

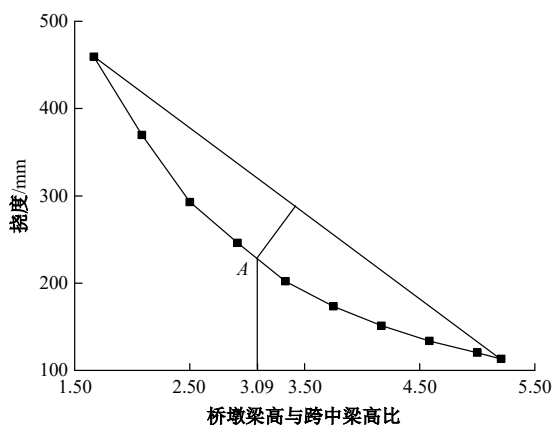


图 6 桥墩梁高与跨中梁高比和挠度关系

Fig. 6 Relationship between deflection and ratio of beam height at pier to midspan

由图 6 可知,当桥墩处梁高  $> 8$  m 时,各梁高比对应主梁最大竖向挠度与跨径比最大值为 1/645,小于规范规定值 1/600。在曲线前段(桥墩处梁高与跨中梁高比较小时),跨中挠度随桥墩处梁高与跨中梁高比的增大而锐减,这表明桥墩处梁高对主梁整体刚度起控制作用;在曲线后段,跨中挠度随桥墩处梁高与跨中梁高比增大而缓慢减小,此时跨中梁高控制主梁整体刚度。为充分发挥桥墩处梁高和跨中梁高对主梁整体刚度的作用,在挠度满足规范要求范围内,对图 6 数据进行 5 次抛物线拟合,选取该曲线端点最远的 A 点作为最优梁高比,对应的桥墩处梁高与跨中梁高比为 3.09,桥墩处梁高为 14.8 m。综合分析,建议桥墩处梁高与跨中梁高比控制在 2.59~3.59。通过多次试算和设计优化,将桥墩处梁高确定为 14 m,跨中梁高取 4 m,桥墩处梁高与跨中梁高之间按照 1.8 次抛物线变化。同时,建议桥墩处梁高设计值采用主跨跨径的 1/26~1/32。

### 2.2.3 墩顶箱梁底板厚度

在悬臂拼装施工和运营过程中,墩顶箱梁底板承受主梁最大压应力,对桥梁安全和跨中挠度有重要影响。因此,可采用短暂状况荷载组合、持久状况荷载组合下的正应力,以及汽车荷载下的跨中挠度控制其厚度。选取桥墩处箱梁底板厚度变化范围为 0.6~1.5 m,跨中箱梁底板厚度为 8 cm,中间线性内插,桥墩处箱梁底板最大压应力和跨中挠度如表 2、图 7 所示。

表 2 墩顶箱梁底板最大压应力和跨中挠度

Table 2 Maximum compressive stress of bottom slab at pier and midspan deflection of box-girder

| 墩顶箱梁底板厚度/m | 最大压应力/MPa | 挠度/mm  | 挠度与主跨跨径比 |
|------------|-----------|--------|----------|
| 0.6        | -43.7     | -307.7 | 1/963    |
| 0.7        | -40.7     | -301.8 | 1/981    |
| 0.8        | -38.3     | -296.8 | 1/998    |
| 0.9        | -36.4     | -292.4 | 1/1 013  |
| 1.0        | -34.8     | -288.6 | 1/1 026  |
| 1.1        | -33.5     | -285.3 | 1/1 038  |
| 1.2        | -32.5     | -282.3 | 1/1 049  |
| 1.3        | -31.6     | -279.7 | 1/1 059  |
| 1.5        | -30.2     | -275.2 | 1/1 076  |

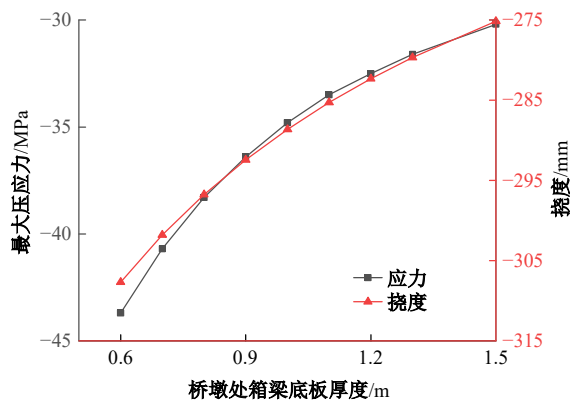


图 7 桥墩处箱梁底板厚度与最大压应力及跨中挠度关系

Fig. 7 Relationship between thickness of bottom plate at pier of box-girder and the maximum compressive stress and midspan deflection

由表 2 可知,在底板厚度范围内,跨中挠度与主跨跨径比的最大值为 1/963,墩顶箱梁底板厚度对结构整体刚度不起控制作用。根据文献[26]第 7.1.2 条规定,使用阶段受压区 UHPC 的最大压应力不超过  $0.5f_{ck}$ ,且考虑 UHPC 材料抗

压强度标准值的 80% 时,箱梁结构受力较优, UC120 和 UC140 对应的最大压应力范围分别为 33.6~42 MPa、39.2~49 MPa,桥墩处箱梁底板的最佳厚度随 UHPC 标号增大而减小,通过线性内插拟合得到对应的箱梁底板厚度分别为 0.66~1.19 m、0.42~0.76 m。本文采用 UC120 混凝土,底板厚度为 0.65 m,建议底板厚度取主跨跨径的 1/335~1/605。

#### 2.2.4 UHP-SSC 箱梁截面构造

UHP-SSC 箱梁的主跨跨中梁高和桥墩处梁高分别为 400、1 400 cm,中间梁段按 1.8 次抛物线过渡,箱梁横向单侧悬臂段长度为 100 cm,箱

梁顶板厚度为 8 cm,桥墩处箱梁底板厚度和跨中箱梁底板厚度分别为 65、8 cm,桥墩处箱梁腹板厚度和跨中箱梁腹板厚度分别为 24、12 cm,内外钢壳厚度均为 8 mm。顶板和底板均采用加劲构造,以提高局部屈曲能力且便于布置预应力钢筋,顶板和底板加劲肋间距、高度和宽度分别为 100、12、12 cm。箱梁顶板、底板的梗腋尺寸分别为 30 cm×30 cm 和 15 cm×15 cm,以减小剪力滞效应的影响且便于布置预应力钢筋。横向受力计算结果表明,横隔板按 6 m 间距布置,采用 8 cm 厚的 UHP-SSC 板形式,在此参数下箱梁顶板能满足结构强度和变形的要求。具体构造见图 8。

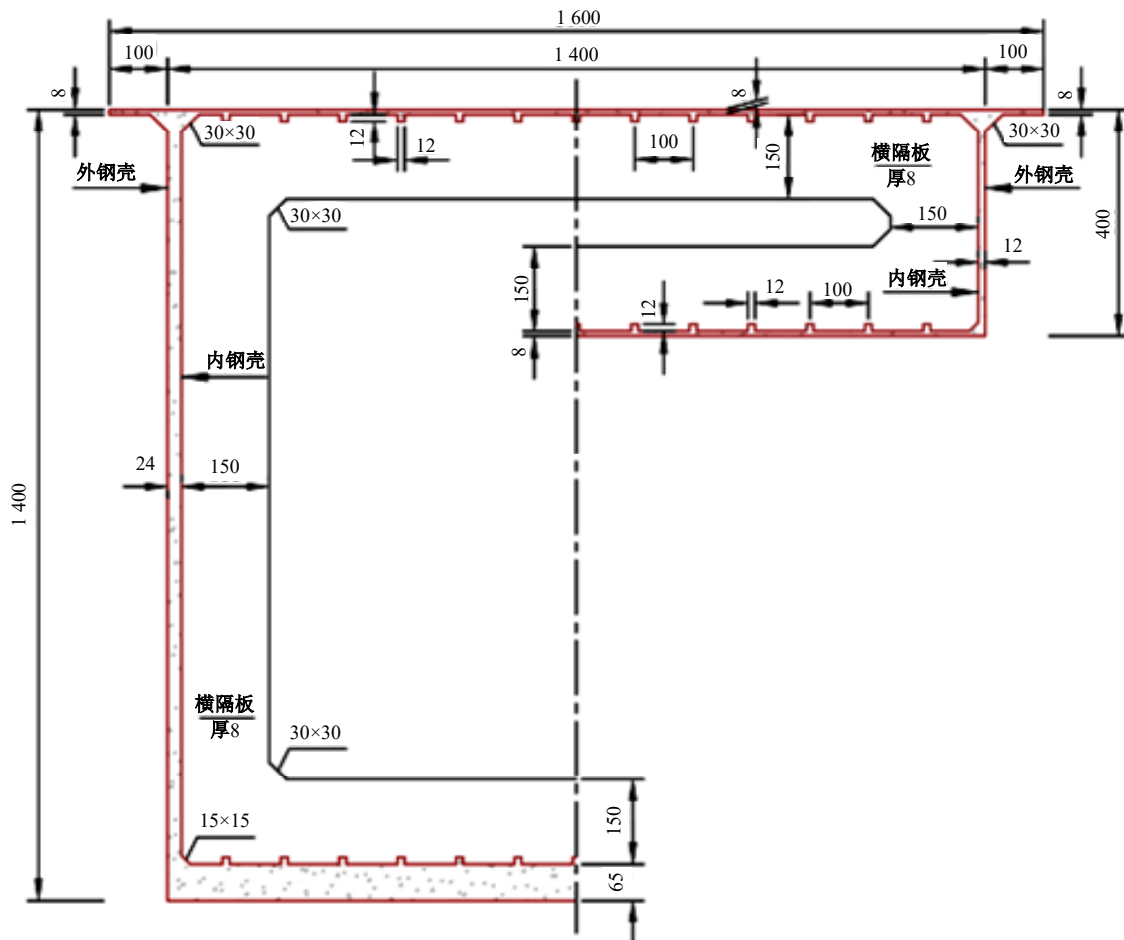


图 8 UHP-SSC 箱梁桥墩处和跨中截面构造(单位:cm)

Fig. 8 Structure with pier and midspan section of UHP-SSC box-girder(unit: cm)

#### 2.3 施工方案

将 UHP-SSC 箱形截面拆分为若干标准杆单元和板单元,所有标准件均在工厂内预制。预制过程中通过高温蒸养和添加微膨胀剂,消除 UHPC 早期收缩,避免 UHPC 与钢壳间出现脱黏、脱空现象,确保钢壳与 UHPC 可靠传力。施工现场采

用桥面吊机或挂篮施工箱梁,既可以吊装整个节段,又可以现场吊装各基本组成杆单元和板单元,在桥位处拼装成箱梁各节段,各标准杆件间和箱梁节段间通过焊接或高强螺栓可靠连接。主梁除桥台处和合龙段长度分别为 14、4 m 外,其他标准节段长度均为 12 m,对应节段的质量范围为

208.9~546.3 t,节段吊装设备采用桥面吊机。施工过程中通过设置预拱度满足箱梁设计成桥线形要求。

2.4 结构整体静力和稳定性分析

2.4.1 结构整体刚度

在移动荷载频遇值作用下,主梁主跨跨中上挠最大位移为 0.056 m,下挠最大位移为 0.242 m,位移幅值 0.298 m,挠度长期增长系数按 1.3 考虑,挠跨比为 1/1033,小于规范限值 1/600,结构刚度满足规范要求。

2.4.2 UHPC 箱梁设计验算

作用基本组合下,UHPC 箱梁抗弯承载力安全系数最小值为 1.21,抗剪承载力安全系数最小值为 1.28,位于墩顶 0#块,承载力满足规范要求。作用频遇组合下,UHPC 箱梁上、下缘最小压应力储备分别为 0.41、0.56 MPa,分别位于墩顶 0#块和跨中主梁,未出现拉应力;主拉应力最大值为 1.93 MPa,位于桥墩 0#块,小于规范限值  $0.4f_{tk}$  (2.32 MPa),截面抗裂满足全预应力构件要求。作用标准组合下,箱梁上、下缘正截面 UHPC 最大压应力分别为 -29.76、-32.17 MPa,分别位于跨中主梁和桥墩主梁 0#块,小于规范限值  $0.5f_{ck}$  (42 MPa);主压应力最大值为 -41.5 MPa,位于桥墩 0#块,小于规范限值  $0.6f_{ck}$  (50.4 MPa),UHPC 箱梁应力满足规范要求。

2.4.3 钢箱梁设计验算

作用基本组合下,钢箱梁上缘最大拉应力、压应力分别为 128.0、-199.5 MPa,下缘最大拉应力、压应力分别为 53.7、-233.5 MPa,均小于厚度为 8 mm 的 Q355 钢壳设计抗拉、抗压强度值

275 MPa;腹板最大剪应力为 126.8 MPa,小于厚度为 8 mm 的 Q355 钢壳设计抗剪强度值 160 MPa,钢箱梁应力满足规范要求。

2.4.4 施工阶段和成桥稳定性分析

对最大悬臂施工阶段和成桥后的稳定性进行分析,对应的稳定系数分别为 33.7、12.5,稳定性满足规范规程要求。

3 主要技术经济指标

将 UHP-SSC 连续刚构桥与类似跨径和宽度的混合梁连续刚构桥、钢管混凝土拱桥、斜拉桥、自锚式悬索桥等主要技术经济指标进行对比,结果如表 3 所示,对应的主要技术经济指标如图 9 所示。

由表 3 和图 9 可知,相较于新型 UHP-SSC 连续刚构桥,混合梁连续刚构桥、钢管混凝土拱桥、

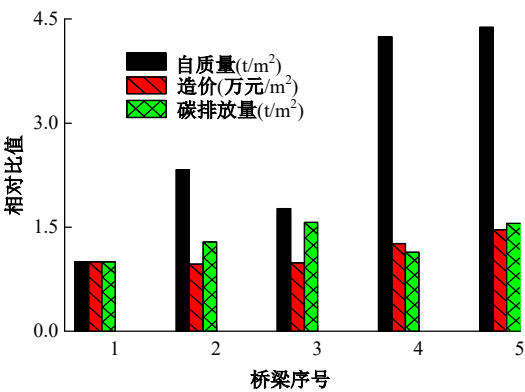


图 9 不同桥型上部结构的主要技术经济指标对比  
Fig. 9 Comparison of superstructure’s main technical and economic indicators of different types of bridge

表 3 上部结构的主要技术经济指标对比

Table 3 Comparison of superstructure’s main technical and economic indicators

| 序号 | 桥名(结构类型)               | 跨径布置/m                 | 桥宽/m | 上部结构混凝土用量/m³ | 上部结构钢材用量/t | 上部结构总质量/t | 上部结构自质量/(t·m <sup>-2</sup> ) | 上部结构造价/(万元·m <sup>-2</sup> ) | 上部结构碳排放量/(t·m <sup>-2</sup> ) |
|----|------------------------|------------------------|------|--------------|------------|-----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 本文(UHP-SSC 连续刚构桥)      | 230+400+230            | 16   | 7 943.0      | 6 118.9    | 25 976.4  | 1.888                        | 1.226                        | 9.753                         |
| 2  | 重庆石板坡长江大桥复线桥(混合梁连续刚构桥) | 87.85+4×138+330+133.75 | 19   | 32 332.0     | 11 332.0   | 92 162.0  | 4.395                        | 1.188                        | 12.536                        |
| 3  | 巫峡长江大桥(中承式钢管混凝土拱桥)     | 460                    | 19   | 9 224.3      | 6 120.1    | 29 180.8  | 3.339                        | 1.210                        | 15.319                        |
| 4  | 干溪沟 1 号桥(斜拉桥)          | 155+360+155            | 27.1 | 55 297.8     | 7 251.7    | 145 496.2 | 8.013                        | 1.545                        | 11.132                        |
| 5  | 红光大桥(自锚式悬索桥)           | 380                    | 25   | 29 179.0     | 5 672.0    | 78 619.5  | 8.276                        | 1.791                        | 15.190                        |

注:普通混凝土造价为 3 500 元/m³,单位碳排放为 0.98 t/m³;钢材造价为 1.2 万元/t,单位碳排放为 20.4 t/m³;UHPC 箱梁造价为 1.2 万元/m³,单位碳排放为 1.18 t/m³。

斜拉桥和自锚式悬索桥的上部结构自重分别增加约132.8%、76.8%、324.4%和338.3%,碳排放量分别增加约28.5%、57.1%、14.1%和55.7%。混合梁连续刚构桥和钢管混凝土拱桥上部结构造价比UHP-SSC连续刚构桥分别减少约3.1%和1.3%;斜拉桥和自锚式悬索桥上部结构造价比UHP-SSC连续刚构桥分别增加约26%和46.1%。由于UHP-SSC连续刚构桥上部结构自质量大幅减小,下部结构造价显著降低,且钢管混凝土拱桥、斜拉桥与自锚式悬索桥后期的养护费用相对较高,综合考虑桥梁全寿命周期造价和耐久性,新型UHP-SSC连续刚构桥具有优越的经济效益和环境效益。

## 4 结 论

(1)提出了一种新型UHP-SSC连续箱梁桥体系,该体系构造简单、养护方便、质轻高强、承载效率高且施工便捷,能克服传统预应力混凝土和钢结构大跨径连续刚构桥的不足,且能在提高连续刚构桥跨越能力的同时而不增加工程造价和施工难度,为特大跨径桥梁方案设计提供新的思路。

(2)开展了主跨400 m级UHP-SSC连续箱梁桥试设计,阐述了箱梁的总体设计流程,明确箱梁合理边中跨比值宜控制在0.5~0.65,桥墩处梁高与跨中梁高比宜为2.59~3.59,其中桥墩处梁高占主跨跨径的1/26~1/32。桥墩处箱梁底板的最佳厚度随UHPC标号的提高而降低,当采用UC120时,推荐底板厚度为0.66~1.19 m,占主跨跨径的1/335~1/605。经设计验算,该桥梁的强度及刚度符合规范规程要求。

(3)UHP-SSC连续刚构桥上部结构的每平方米自质量和碳排放量均比同类规模的混合梁连续刚构桥、钢管混凝土拱桥、斜拉桥及自锚式悬索桥分别减小76.8%~338.3%和14.1%~57.1%;其造价分别高于混合梁连续刚构桥和钢管混凝土拱桥3.1%和1.3%,分别低于斜拉桥和自锚式悬索桥26%和46.1%。综合考虑整桥建造成本和全寿命周期费用,UHP-SSC连续刚构桥具有良好的经济性与环保性。

(4)为减小UHPC过大收缩,在制作UHP-SSC标准杆单元或板单元时需要高温养护,这在一定程度上增加了工厂化预制的难度和造价。此

外,标准杆单元与板单元之间的连接质量对结构体系性能有重要影响,相关技术有待深入研究。

## 参考文献:

- [1] Li J J, Zhang X Y, Wang X D. The influence of buckling mode and buckling stability coefficient of rigid-frame bridge during construction in cold region[J]. *Geofluids*, 2022, No. 5690355.
- [2] Chen C, Wang X Y, Lin Q D, et al. A closure jacking force calculation algorithm for curved prestressed concrete continuous rigid-frame bridges with asymmetric cantilevers and piers[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: No. 7408232.
- [3] Zeng X Z, Deng K L, Wang Y C, et al. Field investigation and numerical analysis of damage to a high-pier long-span continuous rigid frame bridge in the 2008 wenchuan earthquake[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021: 26(6):5204-5220.
- [4] Cui S G, Guo C, Zeng G, et al. Influence of hydrodynamic pressure on fragility of high-pier continuous rigid frame bridge subjected to ground motion[J]. *Ocean Engineering*, 2022: No. 112516.
- [5] Zhao J G, Jia H Y, Zhan Y L. Seismic vulnerability analysis of multi-main-span high pier continuous rigid-frame bridge in terms of cloud method[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2023, No. 12205.
- [6] 彭元诚. 大跨度空腹式连续刚构桥设计理论与方法[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(1): 74-79.  
Peng Yuan-cheng. Design theories and methods for long-span open-web continuous rigid-frame bridge[J]. *Bridge Construction*, 2020, 50(1): 74-79.
- [7] 宋随弟, 陈克坚, 袁明. 波形钢腹板连续刚构桥极限跨度研究[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(4): 72-77.  
Song Sui-di, Chen Ke-jian, Yuan Ming, et al. Study of ultimate spans of continuous rigid-frame bridges with corrugated steel webs[J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(4): 72-77.
- [8] 李立峰, 蒋启昊, 王连华, 等. 变截面波形钢腹板-UHPC组合箱梁剪应力试验[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(5): 150-162.  
Li Li-feng, Jiang Qi-hao, Wang Lian-hua, et al. Shear stress test of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs and UHPC[J]. *China*

- Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 150-162.
- [9] 李磊, 王昌将, 陈向阳, 等. 鱼山大桥通航孔桥钢箱梁设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 79-84.
- Li Lei, Wang Chang-jiang, Chen Xiang-yang, et al. Key design techniques for steel box girder in navigational channel bridge of Yushan bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(5): 79-84.
- [10] 肖金军, 何伟能, 李纯, 等. 基于配束和材料优化的连续刚构桥下挠控制技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 31-38.
- Xiao Jin-jun, He Wei-neng, Li Chun, et al. Deflection control techniques based on prestressing tendons arrangement and material optimization for continuous rigid-frame bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 31-38.
- [11] 王华, 王龙林, 张子墨, 等. 基于裂缝宽度变化的连续刚构桥安全性预警技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(6): 1650-1657.
- Wang Hua, Wang Long-lin, Zhang Zi-mo, et al. Safety early warning technology of continuous rigid frame bridges based on crack width variation[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1650-1657.
- [12] 梅晓亮, 张志强. 港珠澳大桥深水区非通航孔桥钢箱梁架设线形分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 106-110.
- Mei Xiao-liang, Zhang Zhi-qiang. Analysis of installation geometric shapes of steel box girder of non-navigable span bridge of Hong Kong-Macao bridge over deep water area[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 106-110.
- [13] 方明山, 肖汝诚, 王俊颜, 等. 跨海桥梁工程UHPC应用与箱梁试设计研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(5): 1-8.
- Fang Ming-shan, Xiao Ru-cheng, Wang Jun-yan, et al. Application of UHPC in sea-crossing bridge project and trial design of UHPC box girder[J]. World Bridges, 2021, 49(5): 1-8.
- [14] 赵秋, 陈平, 陈宝春, 等. 装配式钢-UHPC组合桥面板试设计及性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(1): 94-99.
- Zhao Qiu, Chen Ping, Chen Bao-chun, et al. Study of trial design and performance of assembled steel and UHPC composite bridge deck[J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 94-99.
- [15] 朱劲松, 秦亚婷, 刘周强. 预应力UHPC-NC组合梁截面优化设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(11): 3151-3159.
- Zhu Jin-song, Qin Ya-ting, Liu Zhou-qiang. Section optimization design of prestressed UHPC-NC composite beams[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(11): 3151-3159.
- [16] 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.
- Shao Xu-dong, Zhan Hao, Lei Wei, et al. Conceptual design and preliminary experiment of super-long-span continuous box-girder bridge composed of one-way prestressed UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 83-89.
- [17] 刘勇, 邵旭东, 詹豪. 主跨400 m的UHPC连续梁桥优化设计[J]. 公路交通科技, 2014, 31(8): 83-90.
- Liu Yong, Shao Xu-dong, Zhan Hao, et al. Optimization design for UHPC continuous girder bridge with 400 m main span[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(8): 83-90.
- [18] 邱明红, 邵旭东, 甘屹东, 等. 单向预应力UHPC连续箱梁桥面体系优化设计研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 87-97.
- Qiu Ming-hong, Shao Xu-dong, Gan Yi-dong, et al. Research on optimal design of deck system in longitudinal prestressed UHPC continuous box girder bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 87-97.
- [19] 贾丽君, 林赞笔, 袁勇根, 等. 预应力UHPC连续刚构桥的优化设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(5): 591-595.
- Jia Li-jun, Lin Zan-bi, Yuan Yong-gen, et al. Optimization design for prestressed UHPC continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(5): 591-595.
- [20] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 13-28.
- Chen Bao-chun, Li Cong, Huang Wei, et al. Review of UHPC shrinkage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(1): 13-28.
- [21] 李传习, 方昌乐, 张永明, 等. 新型组合桥面板UH-

- PC收缩效应足尺试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 94-106.
- Li Chuan-xi, Fang Chang-le, Zhang Yong-ming, et al. Full-scale experiment on UHPC shrinkage effect of innovative composite bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 94-106.
- [22] 史占崇, 苏庆田, 陈亮. 钢-UHPC组合桥面板中焊接栓钉的疲劳性能及设计布置方法[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 107-122.
- Shi Zhan-chong, Su Qing-tian, Chen Liang. Fatigue behavior and design layout method of welded stud connectors in steel-UHPC composite bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 107-122.
- [23] 张清华, 程震宇, 邓鹏昊, 等. 新型钢-UHPC组合桥面板抗弯承载力模型试验与理论分析方法[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 47-64.
- Zhang Qing-hua, Cheng Zhen-yu, Deng Peng-hao, et al. Experimental study and theoretical method on flexural capacity of innovative steel-UHPC composite bridge decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3): 47-64.
- [24] 姜磊, 刘永健, 周绪红, 等. 钢管混凝土组合结构桥梁设计原理与技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2025, 38(3): 278-302.
- Jiang Lei, Liu Yongjian, Zhou Xuhong, et al. Review on design principles and technical development of concrete-filled steel tube composite bridge structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 278-302.
- [25] 刘路明, 方志, 刘福财, 等. 室内环境下UHPC的收缩徐变试验和预测[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 35-44.
- Liu Lu-ming, Fang Zhi, Liu Fu-cai, et al. Experimental study on the shrinkage and creep of UHPC in indoor environments[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 35-44.
- [26] 广东省建筑设计研究有限公司, 湖南大学. 装配式超高性能混凝土市政桥梁结构技术规范: DBJ/T 15-244-2022[M]. 北京: 中国城市出版社, 2022.