

波形钢腹板-UHPC 组合连续箱梁桥 静力和抗震性能研究

朱平^{1,2}, 丁子贤¹, 张哲^{3†}, 邵旭东^{1,2}

[1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007]

摘要:为克服传统大跨预应力混凝土(Prestressed Concrete, PC)连续梁桥自重过大、跨中过度下挠和腹板开裂的问题,将超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)与波形钢腹板(Corrugated Steel Web, CSW)组合,提出大跨径CSWs-UHPC组合连续箱梁桥方案,对该结构的静力性能和抗震性能进行了计算分析,并将其与CSWs-普通混凝土(Normal Concrete, NC)组合连续箱梁桥和PC连续箱梁桥进行对比,结果表明:相比CSWs-NC组合箱梁桥和PC箱梁桥,CSWs-UHPC组合箱梁桥的自重分别降低45%和54%;CSWs-UHPC组合箱梁桥耐久性强、全寿命周期内的经济性具有竞争力;静力计算结果满足规范要求;合理中支点梁高与中跨跨径比 H_s/L 为1/16~1/22,中跨跨中中与中支点合理梁高比 H_m/H_s 为1/1.5~(-0.2+0.029L/H_s);CSWs-UHPC组合箱梁桥横向弯曲自振频率小于PC箱梁桥,竖向弯曲自振频率略大于CSWs-NC组合箱梁桥及PC箱梁桥,较轻的上部结构可大幅降低惯性荷载,使CSWs-UHPC组合箱梁桥具有优异的抗震性能.这种新型组合桥梁可有效克服大跨径连续梁桥下挠、开裂的病害,大幅降低地震响应,是大跨径连续梁桥中具有较强竞争优势的结构型式.

关键词:静力性能;合理梁高范围;自振特性;抗震性能;超高性能混凝土;波形钢腹板

中图分类号:U448.216

文献标志码:A

Study on Static and Seismic Performances of Corrugated Steel Webs-UHPC Composite Continuous Box Girder Bridge

ZHU Ping^{1,2}, DING Zixian¹, ZHANG Zhe^{3†}, SHAO Xudong^{1,2}

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;

3. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China]

Abstract: This paper develops a novel continuous composite box girder bridge by combining ultra-high performance concrete (UHPC) with corrugated steel webs (CSWs) to overcome the weaknesses of traditional long-span prestressed concrete (PC) continuous girder bridges, such as excessive dead load and deflection at the mid-span, and cracking in the webs. The static and seismic performances of the CSWs-UHPC continuous composite box girder

* 收稿日期:2022-02-17

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30131, 2021JJ30128), Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ30131, 2021JJ30128);中国博士后科学基金资助项目(2016M602411), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project(2016M602411)

作者简介:朱平(1977—),男,湖北荆州人,湖南大学讲师,硕士生导师

† 通信联系人, E-mail: zhangzhe@hut.edu.cn

bridge are investigated. And its dynamic performance is compared to that of CSWs-normal concrete (NC) and PC continuous composite box girder bridges. The results reveal that: when compared, respectively, with the CSWs-NC composite box girder bridges and PC box girder bridges, the dead load of the proposed composite structure is reduced by 45% and 54%, the CSWs-UHPC composite continuous box girder bridge is highly durable, economically competitive throughout its life cycle. The static properties of the developed CSWs-UHPC composite structure meet the requirements of the specification. The ratio of the reasonable girder depth at the support to the mid-span (H_s/L) is $1/16 \sim 1/22$, and the ratio of the reasonable girder depth at the mid-span to that at the support (H_m/H_s) is $1/1.5 \sim (-0.2+0.029L/H_s)$. The CSWs-UHPC composite box girder bridge has a lower natural vibration frequency of transverse bending than the PC box girder bridge and a slightly greater natural vibration frequency of vertical bending than both the CSWs-NC composite box girder bridge and the PC box girder bridge. The lighter superstructure significantly reduces the inertia load, which makes the CSWs-UHPC composite box girder have excellent seismic performance. This new type of composite bridge can effectively address the issues previously mentioned for conventional long-span continuous bridges, as well as drastically minimize the seismic response. It will thus be a bridge type with competitive advantages over the traditional long-span continuous girder bridges.

Key words: static performance; reasonable girder depth range; natural vibration characteristics; seismic performance; ultra-high performance concrete (UHPC); corrugated steel web (CSW)

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)是一种新型水泥基复合材料,采用颗粒组分优化级配的方式构建,具有非常高的堆积密度^[1],抗压强度可达120~200 MPa^[2].不连续的孔隙结构能有效减少液体的进入,耐久性得到显著提升^[3].掺入的钢纤维在UHPC基体内不连续且乱向分布,使UHPC具有持续的开裂后拉伸性能,抗拉强度可超过8 MPa^[4].

目前,大跨径预应力混凝土(Prestressed Concrete, PC)连续梁桥存在自重过大,主跨过度下挠以及梁体开裂严重的难题.造成这些问题的主要原因在于普通混凝土(Normal Concrete, NC)抗拉强度低、徐变系数较大.邵旭东教授研发团队^[5]利用UHPC高强度、高耐久性的特征,提出了单向预应力UHPC薄壁箱梁结构,并将这种新的结构形式应用于工程实践:广东省英德市已建成世界最大跨径的单向预应力UHPC简支箱梁桥(跨径102 m),该桥运营状态良好,受到工程界的一致好评.

为克服普通混凝土箱梁桥腹板易开裂问题,法国提出由平钢腹板(Flat Steel Web, FSW)代替混凝土腹板的概念.但FSW沿纵向无法自由伸缩,使得FSWs-NC组合桥梁预应力损失较严重.为此,法国Campeyron Bernar公司提出一种可沿桥梁纵向自由伸缩的新型钢腹板形式:波形钢腹板(Corrugated Steel Web, CSW)^[6].波形钢腹板不约束顶、底板的变形,几乎全部预应力都可作用在顶板和底板上.法国将

波形钢腹板引入工程项目中,取得了良好的效果,并在全世界范围推广.法国、德国、日本等国相继建成了Cognac桥、Dole桥、Altwipfergrund桥、日见梦大桥、安威川大桥等,桥型包括简支梁、连续梁、连续刚构、斜拉桥等.我国也建成了江苏淮安长征人行桥^[7]、郟城黄河公路大桥、深圳平铁大桥等^[8].CSWs-NC组合箱梁桥消除了普通混凝土腹板开裂的风险;对比PC箱梁桥,可降低结构自重约1/5~1/4;无腹板钢筋绑扎立模的过程,施工更为简单方便.

虽然CSW可降低主梁的重量,但箱梁的顶板和底板采用NC使得组合桥梁的自重仍然较大,并成为制约CSWs-NC组合箱梁桥跨径进一步增大的瓶颈.NC具有较大的徐变,使得大跨径预应力混凝土连续梁桥中跨中过度下挠的问题仍难以有效解决^[9-10].并且,NC较低的抗拉强度使得顶、底板仍然易开裂;在使用阶段,受压区普通混凝土的正截面最大压应力限值较低,例如16.2 MPa(C50混凝土).

受已建成UHPC桥梁自重轻、性能优异的启发,本文尝试将CSWs-NC组合箱梁桥的顶、底板替换为UHPC板,提出CSWs-UHPC组合连续箱梁结构,以期能大幅减轻上部结构自重,提升CSWs-UHPC组合连续箱梁桥的跨径,改善主梁跨中过度下挠的问题,消除顶、底板开裂的风险.这种新型组合体系桥梁能突破CSWs-NC组合箱梁桥的瓶颈,成为大跨径连续梁桥中有较强竞争力的一种结构型式.

为验证CSWs-UHPC组合结构的可行性,本文

设计了一座 78 m+130 m+78 m 三跨 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥,利用 Midas/Civil 建立了整桥有限元模型,对其进行静力分析^[11].在此基础上,为便于 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥结构设计,本文对该新型组合桥梁的合理中支点梁高、中跨跨中梁高进行了分析,提出组合梁合理的梁高范围.然后,分析了 CSWs-UHPC 组合箱梁桥的动力特性;研究了 E2 地震波纵向激励作用下,组合梁端位移、墩底弯矩和剪力以及高阻尼橡胶支座的滞回耗能特性,可为 CSWs-UHPC 组合箱梁桥的工程应用提供参考.

1 波形钢腹板-UHPC 组合箱梁桥方案设计

1.1 纵横断面设计

桥梁上部结构为三跨 CSWs-UHPC 组合连续箱梁,跨径布置为 78 m+130 m+78 m,立面如图 1 所示.

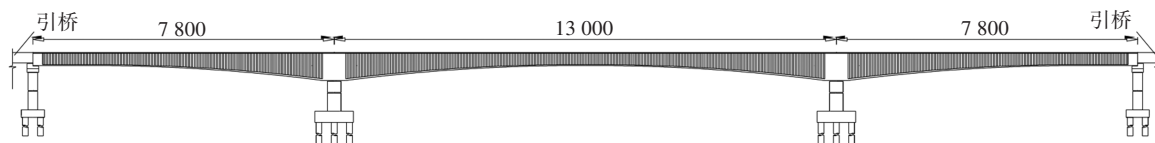


图 1 CSWs-UHPC 组合连续梁桥立面布置图(单位:cm)

Fig. 1 Elevation layout of corrugated steel webs-UHPC composite continuous box girder (unit: cm)

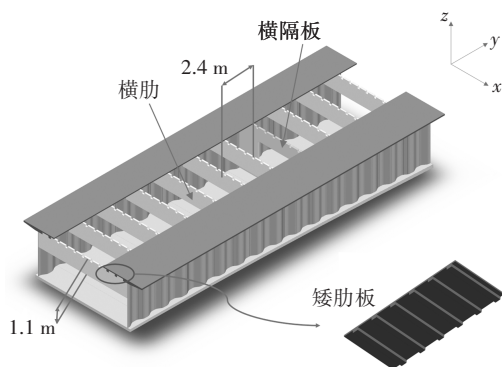


图 2 CSWs-UHPC 组合箱梁节段

Fig. 2 Segmental schematic of corrugated steel webs-UHPC composite box-girder

1.2 波形钢腹板设计

本桥采用 1600 型波形钢腹板^[14],可在工厂采用模压法加工成长 6 400 mm 的安装构件后,再运送至制梁场地进行 CSWs-UHPC 组合箱梁预制节段的施工.要求 CSW 整节段模压成型,节段内无焊缝^[15].CSWs-UHPC 组合连续梁桥的 CSW 厚度变化范围为 12~28 mm.

1.3 UHPC 顶、底板与波形钢腹板的连接

CSW 与 UHPC 顶、底板的连接采用翼缘板+栓钉的连接方式.翼缘板厚 18 mm,宽 550 mm,栓钉直径

主桥分左右双幅,单幅桥采用单箱单室截面,中跨跨中及边跨支点梁高为 3.5 m,中墩支点梁高为 7.5 m. CSWs-UHPC 箱梁顶板宽 10.0 m;UHPC 桥面板采用带有纵肋的矮肋板,UHPC 矮肋板的面板厚 8 cm,纵肋高 14 cm,纵肋间距设为 70 cm.UHPC 桥面板下沿纵向每隔 2.4 m 设置一道 1.1 m 高的 UHPC 横肋,横肋厚度为 12 cm,形成正交异性 UHPC 矮肋板桥面体系,使组合箱梁顶板的主受力方向由横桥向变为纵桥向.UHPC 横肋可有效减小车轮荷载作用下桥面板的纵向应力^[12-13],并有利于体外预应力束的布置.箱梁节段示意图如图 2 所示.UHPC 底板宽 8.0 m,底板厚度沿纵向在 20~45 cm 之间变化;腹板采用 Q345 波形钢腹板.采用节段预制悬臂拼装法施工,相邻节段顶、底板之间采用环氧树脂胶进行接缝处理,相邻 CSW 的连接采用焊接.CSWs-UHPC 箱梁截面布置如图 3 所示.

22 mm,高 100 mm,横向间距为 200 mm,纵向间距为 150 mm,一个翼缘板上可布置 3 列栓钉.UHPC 顶、底板连接件的布置形式相同.

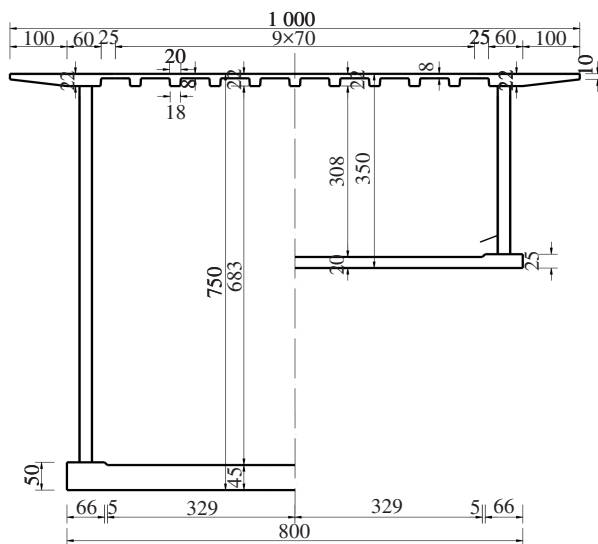


图 3 CSWs-UHPC 箱梁截面(单位:cm)

Fig. 3 Typical cross section of corrugated steel webs-UHPC composite box-girder (unit: cm)

1.4 UHPC 横隔板

在 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥边跨和中跨各设置 4 道和 8 道横隔板,以提高主梁抵抗扭转畸变的

能力,横隔板厚度为 16 cm.部分横隔板兼具体外预应力转向作用,该类横隔板在靠近底板处为马蹄形,厚 50 cm.UHPC 横隔板与波形钢腹板之间采用栓钉连接.

1.5 单向预应力体系

CSWs-UHPC 组合箱梁结构中密集布置的 UHPC 横肋与矮肋式 UHPC 顶板形成正交异性桥面体系^[13],顶板无须设置横向预应力,仅沿桥梁纵向设置预应力,从而形成单向预应力 CSWs-UHPC 组合连续箱梁体系.由于组合箱梁的 UHPC 顶板和底板较薄,为合理布设预应力筋,采用全体外预应力形式^[16].体外预应力束采用 $\Phi_{15.2}$ 高强度低松弛环氧涂覆无黏结成品索^[17],悬臂体外顶板束位于顶板下方,靠近顶板处布置;合拢体外底板束位于底板上方,靠近底板处布置.

1.6 应用前景分析

按照桥梁跨径、桥宽、跨中和支点梁高以及结构设计性能目标相同的原则,设计了 CSWs-NC 组合连续箱梁桥和预应力混凝土连续箱梁桥,与本文提出的 CSWs-UHPC 组合箱梁桥进行对比.3 种方案均采用节段预制悬臂拼装法施工,CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 连续箱梁桥的截面布置分别如图 4 和图 5 所示.

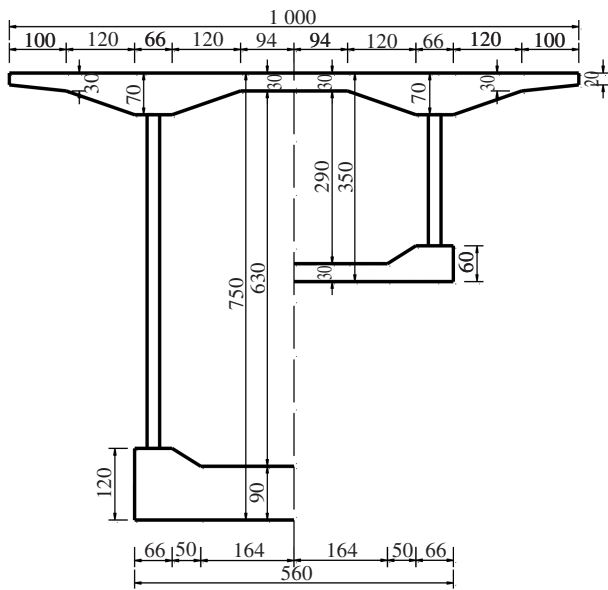


图 4 CSWs-NC 组合箱梁桥截面布置图(单位:cm)
Fig. 4 Typical cross section of CSWs-NC composite continuous box girder bridge (unit: cm)

1.6.1 上部结构自重及有效性分析

3 种方案的上部结构自重及自重效应对比如表 1 所示.由表 1 的数据可以看出,CSWs-NC 组合箱梁

桥对比 PC 箱梁桥,上部结构自重降低了 16.6%,中支点负弯矩减小了 14.6%,活荷载效应比增加了 15.0%,说明仅将混凝土腹板替换为波形钢腹板对于降低中支点负弯矩和提高结构有效性的作用有限.相对于 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥,CSWs-UHPC 组合箱梁桥上部结构自重分别降低了 45% 和 54%,自重荷载作用下中支点负弯矩分别降低了 45.8% 和 53.8%,活荷载效应比(活荷载效应与总效应之比)则分别增加了 66.9% 和 91.8%.这表明使用 CSWs-UHPC 组合箱梁这种结构型式能显著降低自重,大大减小中支点处负弯矩,结构抵抗活荷载的有效性得到明显增强,对提升连续梁桥主跨跨越能力具有较大潜力.

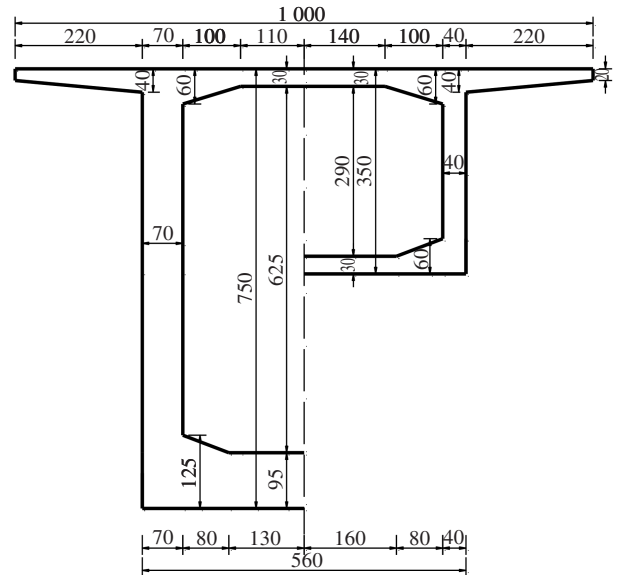


图 5 PC 连续箱梁桥截面布置图(单位:cm)
Fig. 5 Typical cross section of PC continuous box girder bridge (unit: cm)

表 1 结构自重及有效性对比

Tab. 1 Comparisons of dead weight and its effectiveness

桥型方案	自重/ (t·m ⁻²)	自重荷载作用下中 支点负弯矩/(kN·m)	活荷载 效应比/%
CSWs-UHPC 组合箱梁桥	1.445	188 961	28.2
CSWs-NC 组合箱梁桥	2.626	348 942	16.9
PC 连续箱梁桥	3.149	408 611	14.7

1.6.2 耐久性和经济性分析

PC 箱梁桥存在较为严重的耐久性病害,如梁体开裂、跨中过度下挠^[9, 18-19]、体内预应力管道压浆不密实导致的预应力筋锈蚀等问题^[17].CSWs-UHPC 组

合箱梁顶、底板采用 UHPC 替换 NC,使箱梁顶、底板基本无开裂风险;波形钢腹板无开裂隐患,且桥梁钢结构防腐技术也已经相当成熟;预制 CSWs-UHPC 组合箱梁结构在蒸汽养护后,UHPC 顶、底板的后期收缩可基本消除,并且徐变也远小于 NC,可有效解决传统大跨梁桥跨中过度下挠的问题;CSWs-UHPC 组合箱梁桥采用全体外预应力体系,体外预应力束采用无黏结钢绞线外包 HDPE 防护^[17],易检测,可更换,耐久性优异。

将 CSWs-UHPC 组合箱梁桥的经济性与 CSWs-

NC 组合箱梁桥及 PC 箱梁桥进行对比,如表 2 所示。CSWs-UHPC 组合箱梁桥上部结构自重大幅降低,使得运输吊装费用降低,下部结构材料用量也可减少。经估算,对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 连续箱梁桥,CSWs-UHPC 组合箱梁桥的综合单价仅分别增加了 16.8% 和 6.5%。但 CSWs-UHPC 组合箱梁桥耐久性优异,且能避免传统大跨径梁桥各种常见病害的产生,可大幅度降低桥梁病害所带来的后期养护费用,综合而言,CSWs-UHPC 组合箱梁结构在桥梁全寿命周期成本上仍具有竞争力。

表 2 方案经济性比选表

Tab.2 Economic performance among different bridge types

材料用量 及价格	CSWs-UHPC 组合箱梁桥		CSWs-NC 组合箱梁桥		PC 连续箱梁桥		
	每平方米 用量	每平方米 单价/(元·m ⁻²)	每平方米 用量	每平方米 单价/(元·m ⁻²)	每平方米 用量	每平方米 单价/(元·m ⁻²)	
上部结构	C50 或 UHPC	0.462 m ³	4 159	0.950 m ³	2 850	1.187 m ³	3 561
	预应力筋	31.5 kg	472	52.5 kg	788	62.3 kg	934.5
	钢材	166.0 kg	681	103.3 kg	424	0	0
	合计	—	5 312	—	4 062	—	4 496
下部结构(桥墩+盖梁+桩顶系梁)							
普通混凝土(含钢筋)	0.227 m ³	500	0.318 m ³	700	0.318 m ³	700	
上部结构运输吊装	1 440 kg	216	2 670 kg	401	3 086 kg	463	
综合单价/(元·m ⁻²)	6 028 (116.8%)		5 163 (100%)		5 659 (109.6%)		

注:表中括号内的数据表示各桥型方案相对于 CSWs-NC 组合箱梁桥的综合单价比值。主梁配筋普通混凝土 3 000 元/m³;配筋 UHPC 9 000 元/m³;下部结构配筋普通混凝土(含钢筋)2 200 元/m³;预应力筋 15 000 元/t;钢材 4 100 元/t^[20];运输吊装 150 元/t^[21]。

2 波形钢腹板-UHPC 组合箱梁桥静力性能分析

采用有限元软件 Midas/Civil 建立 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥的空间杆系模型,模型包含 84 个梁单元。按照体外预应力钢束的形状并设定适当的摩擦系数,在模型上施加预应力荷载以模拟体外预应力钢束的作用。模型的计算假定:1)波形钢腹板与 UHPC 顶和底板固结,并共同受力;2)UHPC 顶板和底板承担纵向弯矩,波形钢腹板承担横向剪力;3)组合梁弯曲时符合平截面假定。

有限元模型中相关参数取值为:1)UHPC 材料性能参考《超高性能混凝土梁式桥技术规程》(T/CCES 27—2021),UHPC 弹性模量取 41.9 MPa,泊松比取 0.2,抗压、抗拉强度设计值分别取 58 MPa、3.3 MPa,抗压强度标准值取 84 MPa^[22]。CSW 和预应力筋

的材料特性参考《波形钢腹板组合梁桥技术标准》(CJJ/T 272—2017)^[14];2)一期恒载按桥梁设计自重取值,二期恒载为 32.5 kN/m;考虑整体温升和温降 20 °C,梯度温升、温降按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取值^[23];汽车荷载等级为公路-I 级;支座沉降取值为:边支座沉降 5 mm,中支座沉降 10 mm;经高温蒸养后,UHPC 的徐变系数终极值取为 0.2^[22]。

2.1 承载能力极限状态分析

CSWs-UHPC 组合连续箱梁的最小弯矩、最大弯矩设计值及弯矩抗力如图 6 所示,由图 6 可知主梁抗弯承载力计算满足规范《超高性能混凝土梁式桥技术规程》(T/CCES 27—2021)要求^[22]。

主梁最大剪力、最小剪力及剪力抗力如图 7 所示,由图 7 可知主梁抗剪承载力计算满足规范 CJJ/T 272—2017 要求^[14]。

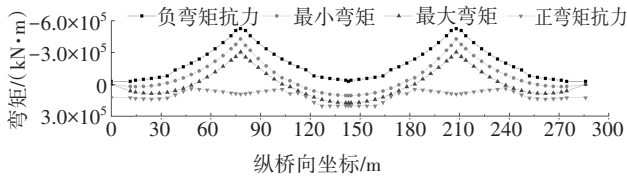


图6 主梁弯矩包络及抗力图

Fig. 6 Bending moment envelope and flexural resistance of the main girder

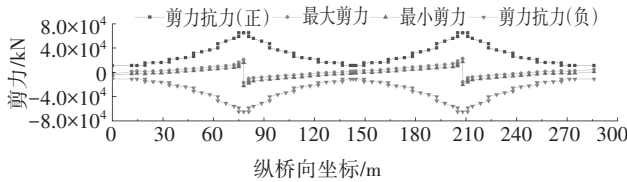


图7 主梁剪力包络及抗力图

Fig. 7 Shear envelope and resistance of the main girder

计算得到CSW弹性局部屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}^e$ 和局部屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,L}$ 如图8所示.弹性整体屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,G}^e$ 和整体屈曲临界剪应力 $\tau_{cr,G}$ 如图9所示.

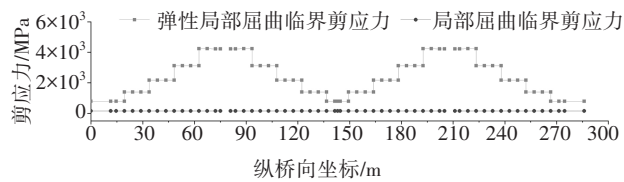


图8 局部屈曲剪应力

Fig. 8 Local shear buckling stress

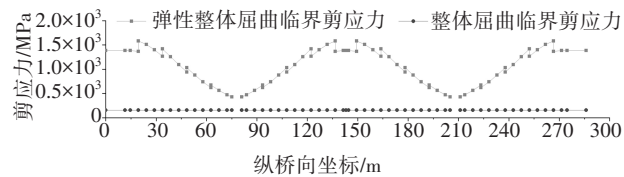


图9 整体屈曲剪应力

Fig. 9 Global shear buckling stress

《波形钢腹板组合梁桥技术标准》(CJJ/T 272—2017)规定CSW剪应力设计值不应超过组合屈曲临界剪应力^[14],即:

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq \tau_{cr} \quad (1)$$

$$\tau_{cr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_{cr,L}^4} + \frac{1}{\tau_{cr,G}^4}\right)^{1/4}} \quad (2)$$

式中: τ_{md} 为剪力与预应力的竖向分力产生的剪应力设计值,MPa; τ_{td} 为扭矩产生的剪应力设计值,MPa; τ_{cr} 为波形钢腹板组合屈曲临界剪应力,MPa; $\tau_{cr,L}$ 为

波形钢腹板局部屈曲临界剪应力; $\tau_{cr,G}$ 为波形钢腹板整体屈曲临界剪应力.

求得组合屈曲临界剪应力 $\tau_{cr}=155$ MPa,剪应力设计值 $\tau_{max}=52.3$ MPa.可知试设计方案CSW承载能力极限状态剪切稳定满足规范CJJ/T 272—2017要求^[14],且具有较大的组合屈曲剪应力富余.

剪力连接件受剪承载力应符合下式要求:

$$\gamma_0 Q_d^e \leq V_u / s \quad (3)$$

式中: Q_d^e 为波形钢腹板与UHPC顶板和底板连接处的单位长度水平剪力设计值,N/mm; V_u 为连接件的水平受剪承载力设计值,N; s 为栓钉顺桥向间距,mm.

经计算可知,栓钉单位长度水平受剪承载力设计值和水平剪力设计值分别为2 128 N/mm和1 132 N/mm,栓钉连接件受剪承载力满足规范要求.

2.2 施工及使用阶段应力分析

表3给出了施工阶段和使用阶段的应力值,从表中可以看出施工阶段应力和正截面压应力均低于规范T/CCES 27—2021限值^[22],荷载频遇组合作用下无拉应力出现,且具有一定的应力储备.

表3 施工及使用阶段应力

Tab.3 Stresses during construction and service stages

		and service stages		MPa	
施工阶段	正截面	正截面	正截面	正截面	正截面
应力验算	抗裂验算	抗裂验算	应力验算	应力验算	应力验算
应力	限值	频遇组合	限值	标准组合	限值
-20.5	-58.8	-3.8	0	-29.6	-42

2.3 合理梁高范围分析

在上述分析中,CSWs-UHPC组合箱梁桥的梁高取值参考了已建成的主跨为120~150 m的CSWs-NC组合箱梁桥方案,目前缺少可直接用于CSWs-UHPC组合连续箱梁桥设计的梁高参数.本节在结构静力分析的基础上,对CSWs-UHPC组合箱梁桥中支点和中跨跨中的合理梁高范围进行分析,以便对主跨跨径为100~200 m的CSWs-UHPC组合连续箱梁桥的结构设计提供可直接参考的合理梁高范围.

2.3.1 中支点和中跨跨中合理梁高范围分析

由组合结构内力和应力分析得到中支点梁高的下限值.随着中支点梁高的降低,中支点负弯矩降低,中跨跨中正弯矩增大.为满足使用阶段抗裂要求,必须增大中跨合拢底板束的数量,可能导致使用

阶段正截面最大压应力超过 $0.5f_{ck}=42\text{ MPa}$ ^[22]. 根据计算可得到中支点梁高的下限值为 6.0 m, 高跨比为 1/22.

由挠度计算得到中跨跨中梁高的下限值^[22]. 分别计算了中支点梁高为 6.0 m、6.5 m、7.0 m、7.5 m 时对应的中跨跨中梁高临界值, 计算结果见表 4.

表 4 不同梁高组合下主跨跨中挠度

Tab.4 Deflection under different combinations of beam depths

中支点梁高/m	中跨跨中梁高/m	挠度/mm	挠度限值/mm	是否符合规范要求
6.0	2.4	217.8	216.7	否
	2.5	204.6		是
6.5	2.3	219.7		否
	2.4	206.8		是
7.0	2.2	221.4		否
	2.3	207.8		是
7.5	2.1	225.6		否
	2.2	211.3		是

由表 4 可知: 当组合梁中支点梁高为 6.0 m、6.5 m、7.0 m、7.5 m 时, 中跨跨中梁高的下限临界值分别为 2.5 m、2.4 m、2.3 m、2.2 m. 计算得到的中支点梁高与主跨跨径比和跨中梁高与主跨跨径比下限值的关系曲线如图 10 所示. 从图 10 可以看出: 中跨跨中梁高跨径比的下限值随支点梁高跨径比的增大而大致呈线性减小的趋势, 拟合线性方程为 $H_m/L = -0.2H_s/L + 0.029$, 即中跨跨中与中支点的梁高比为 $H_m/H_s = -0.2 + 0.029L/H_s$, H_s 表示中支点梁高, L 表示中跨跨径, H_m 表示由先行确定的中支点梁高推算得到的中跨跨中梁高的下限值.

在初始方案的基础上, 增加梁高使中支点附近的波形钢腹板更容易发生整体屈曲, 并且增加用量. 参考 PC 连续箱梁桥梁高取值范围的上限值^[24], 可得到 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥梁高上限值, 即中支点梁高与中跨跨径比 H_s/L 为 1/16, 中跨跨中梁高与中支点梁高比 H_m/H_s 为 1/1.5.

综上可知, CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥合理梁高范围为: 中支点梁高与中跨跨径比 H_s/L 为 1/16 ~ 1/22, 中跨跨中梁高与中支点梁高比 H_m/H_s 为 1/1.5 ~ (-0.2+0.029L/H_s).

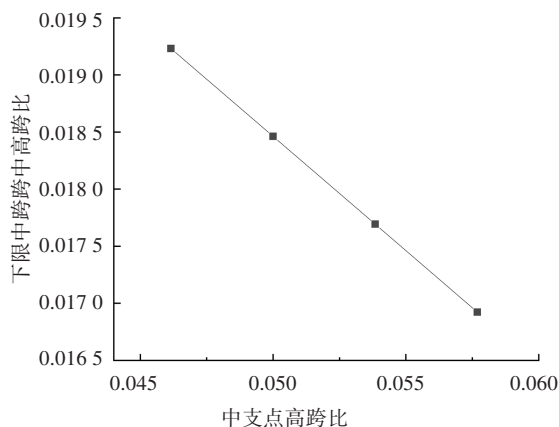


图 10 中支点高跨比-中跨跨中高跨比下限值关系图

Fig.10 Ratio of girder depth at support to mid span length versus the lower limit of the ratio of girder depth at midspan to mid span length

2.3.2 采用梁高限值的组合桥梁方案受力分析

分别采用合理梁高范围的上限值和下限值, 进行相应 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥的受力分析. 方案 1 取合理梁高范围的下限值, 中支点梁高为 6.0 m, 中跨跨中梁高为 2.5 m; 方案 2 取合理梁高范围的上限值, 中支点梁高为 8.1 m, 中跨跨中梁高为 5.4 m. 计算结果如表 5 所示.

表 5 采用梁高临界值的 CSWs-UHPC 组合结构应力

Tab.5 Stresses of the CSWs-UHPC composite plans with critical depths

项目	剪应力	f_{vd}	τ_{cr}	σ_1	σ_2
方案 1	53.8	155	155	-2.8	-35.4
方案 2	47.3	155	128	-2.6	-33.7

注: f_{vd} 为抗剪强度设计值; τ_{cr} 为组合屈曲临界剪应力; σ_1 表示频遇组合正截面抗裂验算; σ_2 表示正截面压应力验算.

从表 5 可以看出: 当分别采用合理梁高范围的上限值和下限值时, CSWs-UHPC 组合箱梁桥的受剪承载力和使用阶段应力均满足规范要求^[9, 14]. 在进行 CSWs-UHPC 组合箱梁桥结构设计时, 梁高取值可参考本文提出的合理梁高范围.

将 2.3.1 节中得到的 CSWs-UHPC 组合箱梁桥合理梁高范围与 PC 箱梁桥和 CSWs-NC 组合箱梁桥的中支点及中跨跨中梁高设计建议值^[15, 24]进行对比可知: CSWs-UHPC 组合箱梁桥中支点及中跨跨中梁高的下限值小于 PC 连续箱梁桥和 CSWs-NC 组合箱梁桥. 这是因为 CSWs-UHPC 组合箱梁桥的自重显著降低, 中支点负弯矩和跨中正弯矩大大减小, 在合理

范围内降低梁高可满足承载力要求.并且本设计方案中所采用的UHPC的抗压强度标准值是C50混凝土的2.6倍,在使用阶段可承受更大的正截面压应力.因此,当跨径和荷载条件相同时,CSWs-UHPC组合箱梁桥的梁高取值可小于CSWs-NC组合箱梁桥和PC箱梁桥.

3 动力性能分析

为探究CSWs-UHPC组合连续箱梁桥的动力特性,分别建立了CSWs-NC组合箱梁桥、PC连续箱梁桥以及CSWs-UHPC组合连续箱梁桥的有限元模型,并考虑了下部结构尺寸变化的影响,对不同桥梁方案的动力特性和在E2地震作用下的非线性动力时程进行了对比分析.

3.1 模型概况

CSWs-UHPC组合箱梁桥A、CSWs-NC组合箱梁桥及PC箱梁桥采用相同的下部结构方案,布置情况为:1#、4#桥墩高19 m,采用矩形空心截面,边长为 $8\text{ m} \times 2.6\text{ m}$,壁厚0.8 m;2#、3#桥墩高15 m,采用边长 $8\text{ m} \times 5\text{ m}$ 矩形空心截面,壁厚1.0 m,如图11、图12(a)所示.为符合工程实际,CSWs-UHPC组合连续箱梁桥B采用截面尺寸缩减的主墩.由于CSWs-UHPC组合箱梁桥上部结构自重比PC箱梁桥降低了54%,所受的汽车制动力与PC箱梁桥相同,综合考虑,CSWs-UHPC组合箱梁桥B的2#、3#桥墩采用边长 $8\text{ m} \times 4\text{ m}$ 矩形空心截面,壁厚0.8 m,如图12(b)所示,1#、4#墩则与其他三种方案相同.各桥梁方案的桥墩横截面尺寸如表6所示.建立的有限元模型忽略了桩土的相互作用,各墩底在地面处固结.



图11 桥墩与支座布置图(单位:m)

Fig.11 Layout of piers and supports (unit: m)

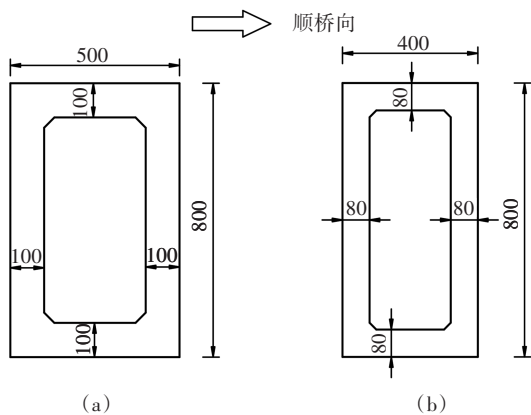


图12 主墩截面布置(单位:cm)

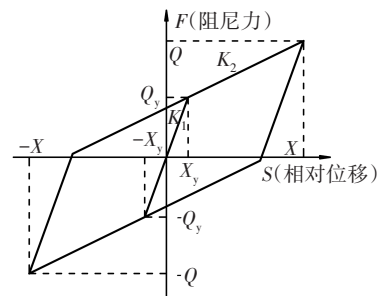
Fig. 12 Typical cross section of main pier (unit:cm)

表6 桥墩横截面尺寸

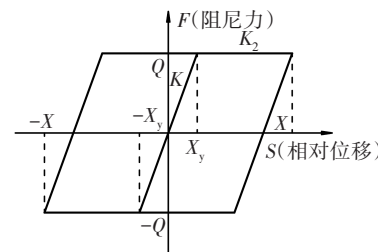
Tab. 6 Cross section dimension of pier

方案名称	主墩外边长/(m×m)	主墩壁厚/m	过渡墩外边长/(m×m)	过渡墩壁厚/m
CSWs-UHPC组合箱梁桥A	8×5	1.0	8×2.6	0.8
CSWs-UHPC组合箱梁桥B	8×4	0.8	8×2.6	0.8
CSWs-NC组合箱梁桥	8×5	1.0	8×2.6	0.8
PC连续箱梁桥	8×5	1.0	8×2.6	0.8

在1#和4#墩顶设置LNR矩形滑动型支座;2#和3#墩顶设置HDR(I)型隔震高阻尼橡胶支座.HDR支座和LNR支座的滞回模型如图13所示.2#、3#墩顶的



HDR高阻尼橡胶支座



LNR滑动支座

K_1 —初始刚度; K_2 —屈服后刚度; Q_y —屈服强度;
 Q —极限强度; X_y —屈服位移; X —极限位移

图13 支座滞回模型

Fig.13 Hysteretic model of bearings

HDR 支座带有剪力键,在正常使用和常遇地震状况下,剪力键起到限制主梁位移的作用;而在罕遇地震下,剪力键可“熔断”,隔震高阻尼橡胶支座通过较大的水平剪切变形能力耗散地震能量^[25].

3.2 地震波选择

地震荷载工况为:分区特征周期 0.4 s,场地类型 II,设防烈度 8(天然地震波峰值加速度为 0.3g)^[26]. 计算得到 E2 地震设计加速度反应谱最大值 $S_{max} = 1.275g$. 根据设计加速度反应谱 E2,采用 SIMQKE-GR 软件,分别生成 E2 人工地震波 3 条,地震波峰值加速度为 0.51g,持续时间均为 40 s, E2 人工地震波如图 14 所示. 由于横桥向地震作用下桥墩的内力和位移较小,本文仅考虑 2# 制动墩在纵桥向地震波作用下的内力响应.

3.3 自振频率与振型

4 种桥梁方案的自振频率与振型特征如表 7 所示. 由表 7 可以看出:对于第 1~第 5 阶振型,CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A 与 CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B 的自振频率基本相同. 4 种桥梁方案的第 1 阶振型均表现为主梁横向弯曲,CSWs-UHPC 组合箱梁桥的自振频率最低,为 0.260 Hz;CSWs-NC 组合箱梁桥的自振频率与 CSWs-UHPC 组合箱梁桥相差较小,为 0.272 Hz;PC 箱梁桥自振频率最高,为 0.490 Hz. 这是因为

CSWs-UHPC 与 CSWs-NC 组合箱梁桥采用波形钢腹板,抵抗横向弯曲的能力较弱.

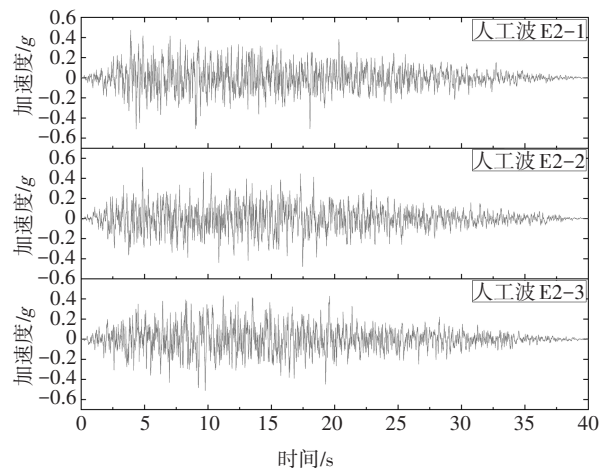


图 14 E2 人工地震波

Fig.14 E2 artificial seismic wave

CSWs-UHPC 组合箱梁桥第 1、2、4 阶为横向弯曲,第 5 阶为竖向弯曲;CSWs-NC 组合箱梁桥第 1、3、5 阶为横向弯曲,第 4 阶为竖向弯曲;PC 箱梁桥第 1、2 阶为横向弯曲,第 4、5 阶为竖向弯曲,表明 3 种方案的横向抗弯刚度均弱于竖向抗弯刚度. 振型为一阶竖弯时,CSWs-UHPC 组合箱梁桥的频率最大,说明 CSWs-UHPC 组合箱梁桥的竖向抗弯刚度最大.

表 7 方案自振特性对比

Tab. 7 Comparisons of natural vibration characteristics of different schemes

模态阶次	CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A		CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B		CSWs-NC 组合箱梁桥		PC 连续箱梁桥	
	自振频率/Hz	振型特征	自振频率/Hz	振型特征	自振频率/Hz	振型特征	自振频率/Hz	振型特征
1	0.260	一阶横弯	0.260	一阶横弯	0.272	一阶横弯	0.490	一阶横弯
2	0.382	二阶横弯	0.382	二阶横弯	0.341	一阶纵飘	0.532	二阶横弯
3	0.403	一阶纵飘	0.402	一阶纵飘	0.355	二阶横弯	0.545	一阶纵飘
4	0.911	三阶横弯	0.909	三阶横弯	0.877	一阶竖弯	0.854	一阶竖弯
5	0.924	一阶竖弯	0.924	一阶竖弯	1.409	三阶横弯	1.653	二阶竖弯

3.4 下部结构相同的 3 种方案地震响应

表 8 为下部结构相同的 3 种方案在 E2 地震波作用下 2# 桥墩墩底弯矩峰值、剪力峰值以及梁端位移峰值. 从表 8 中的数据可以看出:CSWs-UHPC 组合箱梁桥的弯矩峰值、剪力峰值以及梁端位移峰值均小于 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥;CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A 的墩底弯矩峰值对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥分别降低了 20% 和 31%;其墩底剪力峰值对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁

桥则分别降低了 22% 和 29%. 这是因为 CSWs-UHPC 组合箱梁桥上部结构自重相比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥分别降低了 45% 和 54%,使得地震作用下的惯性力大幅降低,因此墩底的弯矩和剪力也显著降低.

从表 8 中的数据还可以看出:CSWs-UHPC 组合箱梁桥梁端纵向位移对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥分别降低了 25% 和 23%. CSWs-NC 组合箱梁桥与 PC 箱梁桥梁端纵向位移峰值仅相差 3%,而

CSWs-NC 组合箱梁桥的自重比 PC 箱梁桥降低了 16.6%，原因是 PC 箱梁桥一阶纵飘对应的自振频率较大(见表 7)，地震作用下位移响应降低，从而抵消了由于较大的惯性力而增加的位移响应。

表 8 地震响应对比

Tab. 8 Comparisons of Seismic responses

方案名称	墩底弯矩 峰值/(kN·m)	墩底剪力 峰值/kN	梁端位移 峰值/mm
CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A	52 095	4 902	111.7
CSWs-NC 组合箱梁桥	64 902	5 600	149.2
PC 箱梁桥	75 907	6 865	144.9

图 15 所示为 E2-1 地震波作用下中墩支座的滞回曲线。CSWs-UHPC 组合箱梁桥支座位移、水平力及滞回曲线包围面积小于 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥，相比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥，CSWs-UHPC 组合箱梁桥支座滞回曲线包围的面积分别降低了 41.3% 和 49.0%。在地震波激励下，CSWs-UHPC 组合箱梁桥需要耗散的能量大大降低。

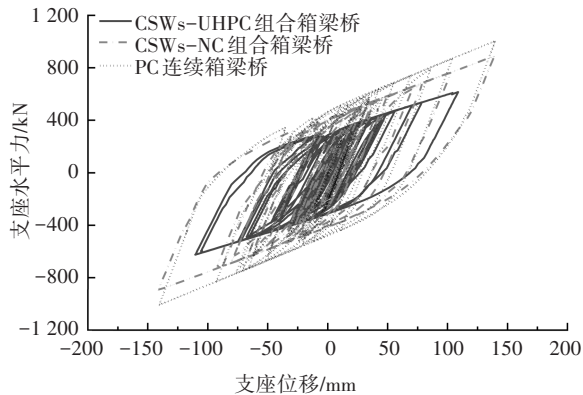


图 15 支座滞回曲线

Fig.15 Hysteretic curves of bearing

3.5 下部结构不同的组合箱梁桥地震响应

由图 16 可以得出：CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A 与 CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B 的支座滞回曲线基本重合。

当主墩横截面尺寸不同时，表 9 给出了 CSWs-UHPC 组合箱梁桥在 E2 地震波作用下 2# 桥墩墩底弯矩峰值、剪力峰值以及梁端位移峰值。从表 9 中的数据可以看出：CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B 的墩底弯矩和剪力峰值对比 CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A 分别降低了 10% 和 14%。由于 CSWs-UHPC 组合箱梁桥

A、B 主墩的支座滞回曲线基本重合，即 2#、3# 桥墩墩顶所受的支座水平力基本相同。2#、3# 桥墩截面尺寸减小后，桥墩的纵桥向弯曲刚度和重量降低，在地震荷载及支座水平力的作用下，墩底弯矩和剪力降低。但 CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A 与 CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B 的梁端位移峰值基本相同。

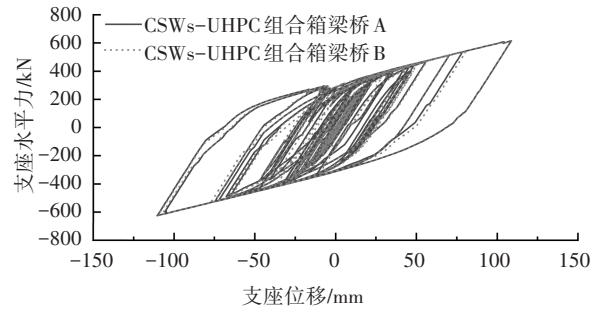


图 16 CSWs-UHPC 组合箱梁桥支座滞回曲线

Fig.16 Hysteretic curves of bearing of CSWs-UHPC composite box girder bridges

表 9 CSWs-UHPC 组合箱梁桥地震响应对比

Tab. 9 Comparisons of Seismic responses of CSWs-UHPC composite box girder bridges

方案名称	墩底弯矩 峰值/(kN·m)	墩底剪力 峰值/kN	梁端位移 峰值/mm
CSWs-UHPC 组合箱梁桥 A	52 095	4 902	111.7
CSWs-UHPC 组合箱梁桥 B	46 721	4 199	112.3

由以上分析可以得出：在 E2 地震波作用下，CSWs-UHPC 组合箱梁桥可降低梁端位移以及中墩墩底处的弯矩和剪力，使得隔震橡胶支座所需要消耗的能量显著降低。CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥在地震荷载作用下的纵向位移较大，需要设置一定数量的阻尼器以减小纵向位移；而 CSWs-UHPC 组合箱梁桥可不设阻尼器或仅设置较少数量的阻尼器即可满足结构抗震的需求。

4 结论

本文利用 UHPC 的高强度、高韧性的特点，设计了一座大跨径全体外预应力 CSWs-UHPC 组合连续箱梁桥，对其进行了结构静力和抗震性能分析，并将其与 CSWs-NC 组合箱梁桥及 PC 连续箱梁桥进行对比，得到如下结论：

- 1) 对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥，

CSWs-UHPC 组合箱梁桥的自重分别降低了 45% 和 54%, CSWs-UHPC 组合箱梁桥的使用荷载作用效应占总效应的比例分别提高了 66.9% 和 91.8%, 对提升连续梁桥主跨跨越能力具有较大潜力。

2) CSWs-UHPC 组合箱梁桥上部结构自重的大大降低, 能进一步减少下部结构的工程量, 降低运输吊装成本, 且 UHPC 在桥梁运营期不需要养护, CSWs-UHPC 组合箱梁桥全寿命周期成本具有一定的优势。

3) 130 m 跨径波形钢腹板-UHPC 组合箱梁桥合理梁高范围为: 中支点高跨比 $H_s/L=1/16 \sim 1/22$, 中跨跨中梁高与中支点梁高比 $H_m/H_s = 1/1.5 \sim (-0.2+0.029L/H_s)$ 。

4) 由于 CSWs-UHPC 组合箱梁桥上部结构自重较轻, 惯性荷载大大降低, 地震响应显著降低; CSWs-UHPC 组合箱梁桥可不设阻尼器或仅设置较少数量的阻尼器即可满足结构抗震的需求。

综上所述, CSWs-UHPC 组合箱梁桥具有良好的全寿命周期经济性和静力性能, 其自重、结构有效性和抗震性能对比 CSWs-NC 组合箱梁桥和 PC 箱梁桥均具有明显优势, 是大跨径连续梁桥中一种有较强竞争力的结构型式。

参考文献

[1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1501-1511.

[2] DUGAT J, ROUX N, BERNIER G. Mechanical properties of reactive powder concretes[J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(4): 233-240.

[3] 宋少民, 未翠霞. 活性粉末混凝土耐久性研究[J]. *混凝土*, 2006(2): 72-73.

SONG S M, WEI C X. Durability of the reactive powder concrete (RPC)[J]. *Concrete*, 2006(2): 72-73. (In Chinese)

[4] GRAYBEAL B A. Material property characterization of ultra-high performance concrete[R]. Washington D C: Federal Highway Administration Office of Infrastructure, 2006: 50-90.

[5] 邵旭东, 曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(5): 41-58.

SHAO X D, CAO J H. Research and application of high performance bridge structures toward future [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2017, 34(5): 41-58. (In Chinese)

[6] 陈宝春, 黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. *公路*, 2005, 50(7): 45-53.

CHEN B C, HUANG Q W. A summary of application of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs [J]. *Highway*, 2005, 50(7): 45-53. (In Chinese)

[7] 陈朦朦, 万水. 波形钢腹板 PC 组合箱梁在我国桥梁工程中的应用[J]. *湖南交通科技*, 2006, 32(4): 124-126.

CHEN M M, WAN S. Application of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs in China [J]. *Hunan Communication Science and Technology*, 2006, 32(4): 124-126. (In Chinese)

[8] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 1-10.

CHEN Y Y. Design and construction of prestressed concrete box-girder bridges with corrugated steel webs [M]. Beijing: China Communication Press, 2009: 1-10. (In Chinese)

[9] 谢峻, 王国亮, 郑晓华. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. *公路交通科技*, 2007, 24(1): 47-50.

XIE J, WANG G L, ZHENG X H. State of art of long-term deflection for long span prestressed concrete box-girder bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(1): 47-50. (In Chinese)

[10] 陈宇峰, 徐君兰, 余武军. 大跨 PC 连续刚构桥跨中持续下挠成因及预防措施[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2007, 26(4): 6-8.

CHEN Y F, XU J L, YU W J. Causes and precautionary measures to long-term deflection of long span prestressed concrete box girder of continuous rigid frame bridge [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2007, 26(4): 6-8. (In Chinese)

[11] 李淑琴, 万水, 乐斐. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥结构分析与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 1-38.

LI S Q, WAN S, LE F. Structural analysis and examples of PC composite box-girder bridge with corrugated steel webs [M]. Beijing: China Communication Press, 2015: 1-38. (In Chinese)

[12] 邵旭东, 杨志杰, 邹同琛, 等. 密集横隔板 UHPC 箱梁桥面板双向受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(8): 43-49.

SHAO X D, YANG Z J, ZOU T C, et al. Bidirectional mechanical behavior experiment of UHPC box-girder bridge deck with dense diaphragms [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(8): 43-49. (In Chinese)

[13] 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 M H, SHAO X D, GAN Y D, 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. (In Chinese)

[14] 波形钢腹板组合梁桥技术标准: CJJ/T 272—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 12-26.

Technical standard for composite girder bridges with corrugated steel webs: CJJ/T 272—2017 [S]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2017:12–26. (In Chinese)
- [15] 李淑琴, 万水, 张长青. 波形钢腹板设计与制造[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 1–13.
- LI S Q, WAN S, ZHANG C Q. Design and manufacture of corrugated steel webs [M], Beijing: China Communications Press, 2011:1–13. (In Chinese)
- [16] 李国平. 体外预应力混凝土桥梁设计计算方法[D]. 上海: 同济大学, 2007: 143–147.
- LI G P. Calculating method for design of externally prestressed concrete bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2007: 143–147. (In Chinese)
- [17] 李国平. 预应力混凝土结构设计原理[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- LI G P. Design principles of prestressed concrete structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2009. (In Chinese)
- [18] 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.
- LOU Z H. Main faults in large span beam bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 84–87. (In Chinese)
- [19] 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.
- WANG G L, XIE J, FU Y F. Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 52–56. (In Chinese)
- [20] 刘兆锋, 方志, 苏捷. 大跨活性粉末混凝土混合梁斜拉桥的方案设计及性能分析[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(3): 157–163.
- LIU Z F, FANG Z, SU J. Schematic design and performance of long-span cable-stayed bridge with hybrid girders of RPC and normal concrete[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(3): 157–163. (In Chinese)
- [21] 赵明, 何湘峰, 邱明红, 等. 全预制钢-UHPC轻型组合梁在中小跨径桥梁中的设计与应用研究[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 63–66.
- ZHAO M, HE X F, QIU M H, *et al.* Research on design and application of fully prefabricated steel UHPC lightweight composite girder in medium and small span girder bridge [J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 63–66. (In Chinese)
- [22] 超高性能混凝土梁式桥技术规程: T/CCES 27—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 8–39.
- Technical specification for ultra-high performance concrete girder bridge: T/CCES 27—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 8–39. (In Chinese)
- [23] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 34.
- General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communication Press, 2015: 34. (In Chinese)
- [24] 邵旭东, 陈政清, 顾安邦. 桥梁工程[M]. 5版. 北京: 人民交通出版社, 2019: 83–95.
- SHAO X D, CHEN Z Q, GU A B. Bridge engineering [M]. 5th ed. Beijing: China Communication Press, 2019: 83–95. (In Chinese)
- [25] 李立峰, 胡思聪, 吴文朋, 等. 桥梁抗震剪力键的力学模拟及减震效应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(11): 8–14.
- LI L F, HU S C, WU W P, *et al.* Research of mechanical simulation and seismic mitigation effect for the bridge seismic dowel [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(11): 8–14. (In Chinese)
- [26] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01-2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 35–58.
- Specifications for seismic design of highway bridges: JTG 2231-01-2020 [S]. Beijing: China Communication Press, 2020: 35–58. (In Chinese)