文章编号:1674-2974(2024)11-0126-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024114

PC与钢-UHPC混合式连续梁桥结合段受力分析

邵旭东[1,2],熊满华[1,2†],怀臣子[3],莫然[4],杨纪[3]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003;
4. 广东省建筑设计研究院集团股份有限公司,广东 广州 510000]

摘 要:针对连续箱梁桥因自重过大导致开裂严重的工程难题,提出了一种PC梁(Prestressed Concrete,PC)与钢-UHPC(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)组合梁结合的新型混合式连续梁桥.为探明新型桥梁中UHPC层的受力特性及其对钢-混结合段传力机理的影响,以滨州黄河大桥为工程背景,首先建立了Midas整体计算模型,获得了结构在承载能力极限状态下的内力,然后采用ANSYS分别建立了无UHPC层和有UHPC层两种构造的钢-混结合段有限元局部模型,对比了两个构造结合段的受力特点及传力机理,分析了UHPC层的受力特性.计算结果表明:1)除了部分应力集中区域外,新型结构各部分应力均低于强度设计值,满足设计要求;2)最不利弯矩作用下,新型结构的钢箱梁顶板最大拉应力得到显著降低,可显著延长钢结构的疲劳寿命;3)新型结构的混凝土梁顶板在交界面处的应力下降了约5%~29%,可改善混凝土开裂现象;4)UHPC层的最大拉应力和压应力均低于其设计强度,满足规范要求,且UHPC层能分担4%~10.9%的结合段截面弯矩.

关键词:桥梁工程;混合梁结合段;数值分析;力学性能;钢-UHPC组合梁
中图分类号:U443.33 **文献标志码**:A

Mechanical Analysis on Joint Section of PC and Steel-UHPC Hybrid Continuous Girder Bridges

SHAO Xudong[1,2],XIONG Manhua[1,2†],HUAI Chenzi[3],MO Ran[4],YANG Ji[3]
[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
4. Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China]

Abstract: In order to solve the engineering problem of continuous box girder bridges with severe cracking due to excessive self-weight, a combined PC and steel-UHPC composite beam continuous hybrid girder bridge is proposed.

* **收稿日期**:2023-12-31
基金项目:湖南省研究生科研创新项目(CX2017B118),Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province(CX2017B118);国家自然科学基金重点项目(52038003),Key Project of National Natural Science Foundation of China(52038003);河南省重点研发计划资助项目(212102310452),Key R&D Program of Henan Province (212102310452).
作者简介:邵旭东(1961—),男,浙江富阳人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:xiongmanhua1108@163.com

To investigate the mechanical properties of the UHPC layer in the new type of bridge as well as its effect on the force transfer mechanism of the joint section of steel-UHPC composite girder, a Midas integral FE model was established to obtain the internal force of the structure under the design load effect, taking Binzhou Yellow River Bridge in Shandong Province as the engineering background. Meanwhile, two FE sub-models of the joint section of the steel-UHPC composite girder with and without UHPC layer were established by using ANSYS, respectively. The differences between the two models in the force performance and load transfer mechanism of the steel-concrete joint section were compared, and the mechanical properties of the UHPC layer were analyzed. The FE results show that: 1) Except for some stress concentration areas, the stresses in all parts of the new structure are lower than the strength design value, meeting the design requirements; 2) Under the most unfavorable bending moment, the maximum tensile stress of the top plate of the new structure's steel box girder is significantly reduced, which can significantly improve the fatigue life of the steel structure; 3) The stress at the interface of the top plate of the new structural concrete beam is decreased by about 5%~29%, which can improve the cracking resistance; 4) The maximum tensile and compressive stresses of the UHPC layer are lower than their design strength, meeting the design requirements, and the UHPC layer can share 4%~10.9% of the bending moment of the joint section.

Key words: bridge engineering; joint section of hybrid girder; numerical methods; mechanical properties; steel-UHPC composite girder

大跨多跨连续PC梁桥具有刚度大和行车舒适等优点，得到了广泛应用，但因其梁体过重，普遍存在腹板开裂和跨中下挠的问题[1]. 近年来，PC主梁和钢主梁结合的混合梁结构凭借其相对于纯PC梁更优的受力性能、跨越能力及经济性能，在国内外得到了推广应用[2]. 对于大跨度梁式桥而言，在主跨跨中采用钢梁、其余部分采用PC梁，能有效地降低结构自重，缓解纯混凝土主梁由于自重过大而产生的梁体开裂、跨中下挠过大等问题[1,3].

但是，由于采用了钢主梁，混合梁结构也面临着钢结构桥梁遇到的难题：钢桥面由于局部刚度较小、在汽车荷载作用下易疲劳开裂[4]，同时，钢桥面沥青铺装易开裂、耐久性不足. 因此，提出一种PC梁与钢-UHPC组合梁结合的新型混合式连续梁桥，该结构将密集配筋的UHPC层铺设在钢桥面板之上，并通过焊接在钢面板上的短栓钉将UHPC层和钢桥面紧密连接，从而充分利用UHPC的优异性能和钢结构自重轻的优势，在实现跨中梁段轻型化的同时提高钢桥面和桥面铺装抗裂性能. 大量理论和试验研究表明，钢-UHPC组合桥面结构具有优异的力学性能[5-10].

由于混合梁结构在钢-混结合段区域存在刚度突变，结构构造和受力情况均较复杂，钢主梁和混凝土主梁的交界面是钢-混结合段的薄弱位置，若处理不当，交界面易出现开裂、渗水等病害，影响大桥的安全性和耐久性. 因此，在设计和研究中应给予该部位重点关注[11]，通过合理的构造形式，保证钢梁和混凝土梁在结合段紧密、有效地联合，实现混合梁刚度与内力的平顺过渡. 应当在混合梁的钢-混结合段附近设置UHPC过渡段，即令钢-UHPC组合梁的UHPC层延伸越过钢-混结合段，并外伸至混凝土梁段的新型钢-混结合段构造，利用UHPC优异的抗裂性能[8]防止界面区域出现因混凝土开裂导致的渗水等病害.

国内外学者针对钢-混结合段受力特性及结合段构造做了很多理论计算及试验研究[2,12-17]，对钢-混结合段的受力性能有了较为全面的认识. 张鹏[2]通过有限元计算，研究了钢-混结合段的传力机理、变形特性，分析了各种连接措施以及开孔钢板连接件的受力性能和特点. 何伟兵等[12]建立ANSYS节段模型研究了斜拉桥结合段连接部件的受力分布和内力分担比例，发现承压板承担了约70%的轴力. 邓文中等[13]介绍了重庆石板坡长江大桥复线桥（连续刚构桥）混合梁结构的设计理念和施工方法. 王军文等[14]则通过有限元计算验证了石板坡长江大桥钢-混结合段设计的可行性，发现除了钢箱梁锚垫板下预应力管道支承钢板和混凝土箱梁接合面折角处等一些局部区域外，结构整体处于较低应力状态，满足设计要

求.胡建华等[15]通过试验研究了钢-混结合段PBL剪力键的受力性能,发现孔洞直径、PBL筋直径、混凝土强度和箍筋强弱对PBL键承载力影响较大.贺绍华[16]通过模型试验、有限元分析和简化力学模型对设置PBL剪力键且格室内灌注活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,RPC)的钢-混结合段的受力性能进行了研究,发现格室内灌注RPC能有效提高钢-混结合段PBL键的抗剪承载力.周阳等[17]通过模型试验研究了铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段的传力机理,验证了结合段具有良好的抗疲劳性能.

然而,当前对大跨多跨PC梁与钢-UHPC组合梁结合的混合式连续梁桥结合段受力性能的研究尚较缺乏.因此,本文以山东滨州黄河大桥为工程背景,通过有限元计算对新型结构进行分析,研究新型钢-混结合段构造的受力特性以及UHPC层对钢-混结合段受力性能的影响,为新型结构的试验研究和工程应用提供理论依据.

1 滨州黄河大桥概况

滨州黄河大桥全长1 110 m,主桥桥跨布置为(80+5×190+80)m,桥梁全宽37.0 m,采用分幅设计,单幅桥面宽18.25 m.主桥跨中60 m范围采用钢-UHPC组合梁,其他部位均采用PC梁.根部梁高10.0 m,跨中梁高4.0 m,采用1.8次抛物线变化.桥跨布置如图1所示.

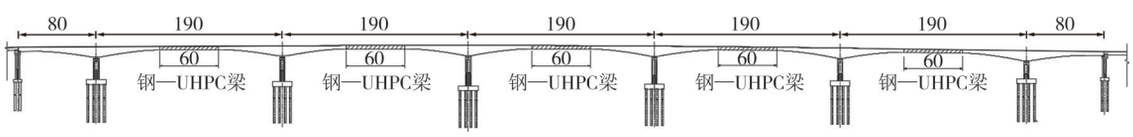


图1 桥跨布置(单位:m)

Fig.1 Layout of bridge span(unit: m)

钢-混结合段采用有格室的后承压板传力,结合段长度为1.5 m.钢箱梁刚度过渡段长度为8.5 m,在刚度过渡段内的顶、底板设有变高度T形加劲肋.混凝土箱梁过渡段长度为4.5 m,过渡段内的混凝土箱梁顶板、底板和腹板均进行加厚.结合段的钢结构通过PBL键、剪力钉与钢格室内填充的混凝土紧密连接,结合段顶板、腹板、底板中均布置预应力束.为防止钢-混结合段界面开裂、渗水,钢-UHPC组合梁的UHPC层延伸越过钢-混结合段,并外伸2.5 m至混凝土梁段.结合段立面构造如图2所示.

PC梁采用C55混凝土,钢-UHPC组合梁的UHPC层厚度为50 mm,UHPC层内密集配筋,布置ϕ10 HRB400钢筋网,纵向和横向间距均为37.5 mm,钢结构采用Q345,钢桥面板上焊接长38 mm、直径13 mm的短栓钉,横纵向间距均为150 mm,钢-混结合段构造如图3所示.

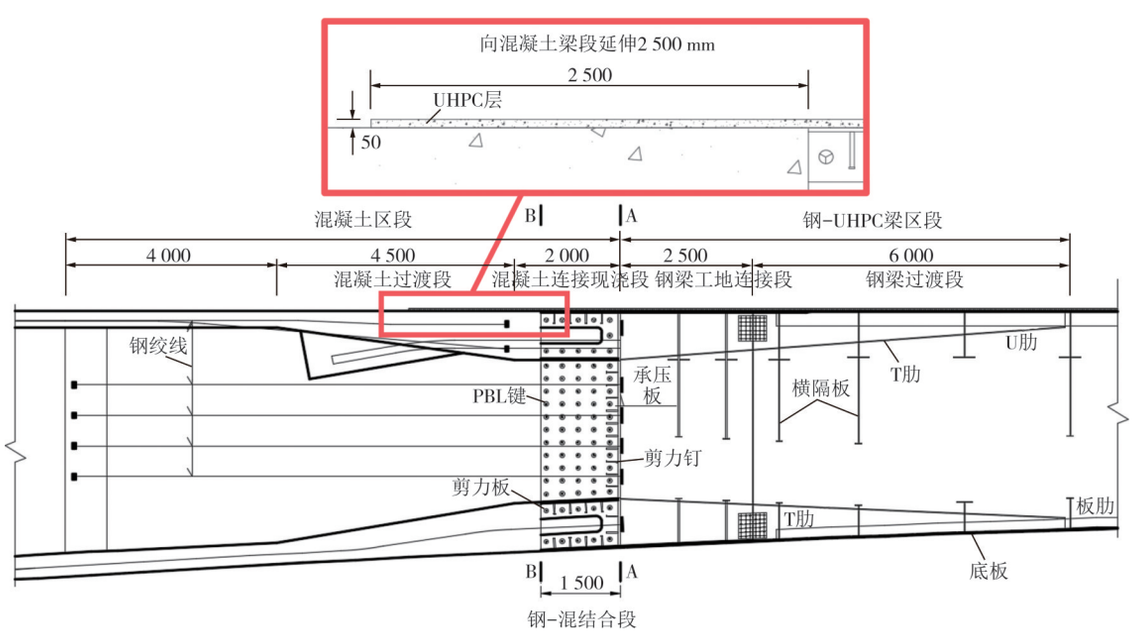
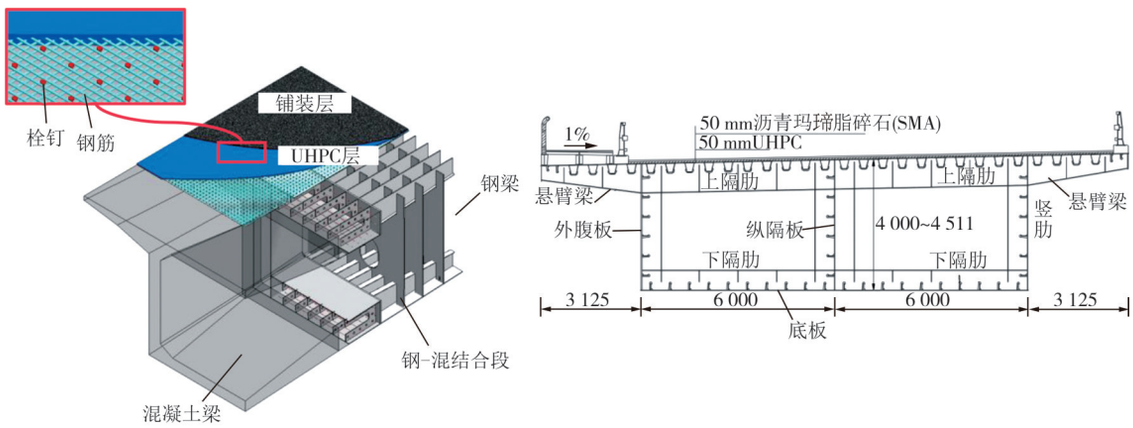


图2 钢-混结合段纵断面图(单位:mm)

Fig.2 Longitudinal section of the steel-concrete joint section(unit: mm)



(a) 钢-混结合段三维示意图　　(b) 钢-混结合段标准断面图

图 3　钢-混结合段构造示意图(单位:mm)

Fig.3　Sketch map of the construction of steel-concrete joint section(unit:mm)

大桥的混凝土梁用悬臂施工法进行浇筑,跨中钢-UHPC组合梁在工厂预制完成后运送至现场,通过顶推法进行组合梁的拼装.钢-混结合段的UHPC层待结合段混凝土梁浇筑及预应力张拉完成后再进行施工.

为研究大跨多跨PC与钢-UHPC混合式连续梁桥钢-混结合段这一新型结构的受力特点,本文先通过Midas软件进行整体计算,按我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)[18]考虑荷载效应并进行荷载组合,从而得到结构在设计荷载下的内力;随后建立ANSYS局部模型进行精细化分析,将Midas计算得到的最不利荷载效应输入局部模型,进而分析钢-混结合段的传力机理和UHPC层对结合段受力的影响.

2　全桥整体计算

2.1　有限元模型概况

为探明PC与钢-UHPC混合式连续梁桥的整体受力性能,采用Midas软件对滨州黄河大桥建立了全桥整体模型,计算采用梁单元,对混凝土段定义变截面属性,钢-UHPC梁段采用组合截面并设置施工阶段联合截面,根据实桥支座布置情况设置边界条件,按实际施工顺序设置施工阶段,模型共建立371个节点、354个单元、50个施工阶段,所使用主要材料的属性见表1.其中UHPC的材料特性参考《钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范》(DB43/T 1173—2016)[19]取值.有限元模型如图4所示.桥梁安全性等级为一级,结构重要性系数取γ=1.1.

表 1　模型材料属性

Tab.1　Material properties in model

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/(1·℃$^{-1}$)
C55混凝土	2 500	35.5	0.2	1.0×10^{-5}
Q345D钢	7 850	206	0.3	1.2×10^{-5}
预应力钢绞线	8 005	195	0.3	1.2×10^{-5}
UHPC	2 800	42.6	0.2	1.1×10^{-5}



图 4　Midas有限元整体模型

Fig.4　Global Midas FE model

2.2　主要计算结果

承载能力极限状态计算依照《公路桥涵设计通用规范》[18],考虑结构自重、预应力、收缩徐变、支座沉降、车道荷载、人群荷载和温度作用,按承载能力极限状态基本组合进行荷载效应的组合计算,得到4个最不利工况,计算结果如表2所示.

表 2　最不利工况下的结构弯矩和剪力

Tab.2　Bending moment and shear force of structure under the most unfavorable conditions

	工况	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
弯矩最不利	工况一:最大正弯矩	1.14×10^{5}	2.85×10^{3}
	工况二:最大负弯矩	−6.62×10^{4}	3.04×10^{3}
剪力最不利	工况三:最大正剪力	2.37×10^{4}	5.74×10^{3}
	工况四:最大负剪力	−1.30×10^{4}	−6.31×10^{3}

钢-UHPC组合梁峰值应力计算结果如表3所示.对于钢梁,底板最大拉应力95.2 MPa,小于《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)要求的设计

容许值270 MPa[20],对于UHPC桥面板,最大拉应力9.3 MPa,虽然小于《钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范》(DB43/T 1173—2016)[19]中关于钢-UHPC组合结构中强度等级为STC25的抗弯拉强度设计值17.2 MPa,但相对较高,下文结合段局部模型计算将重点关注UHPC的抗裂性能.

表3 钢-UHPC组合梁峰值应力计算结果

Tab.3 Peak stress of steel-UHPC composite girder

材料位置		拉应力/MPa	压应力/MPa
UHPC桥面板	顶缘	8.2	-15.8
	底缘	9.3	-11.4
钢梁	顶缘	41.1	-85.8
	底缘	95.2	-62.4

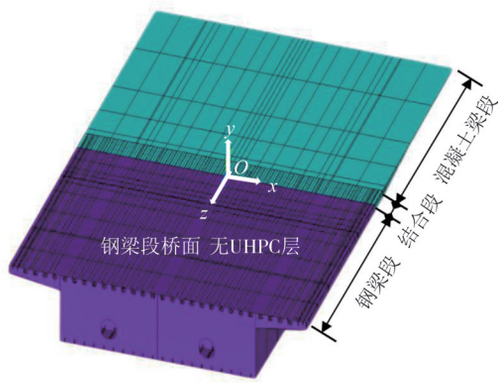
3 钢-混结合段有限元计算

依据滨州黄河大桥的实际构造,采用ANSYS有限元软件分别建立无UHPC层和有UHPC层的两种钢-混结合段有限元模型(分别简称无UHPC模型和有UHPC模型). 以第2节中整体计算得到的承载能力极限状态下的4个最不利工况的内力结果,作为模型加载的最不利等效内力.

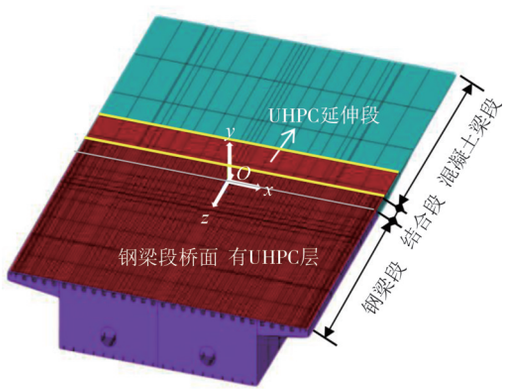
3.1 有限元建模

以横桥向为x轴,竖直方向为y轴,纵桥向为z轴;模型坐标原点在横向位于箱梁截面中轴处,竖向位于钢箱梁顶面,纵向位于钢梁和结合段交界面;钢梁位于z轴正侧,结合段与混凝土梁位于z轴负侧,模型坐标轴详见图5. 钢-混结合段长1.5 m,根据圣维南原理,为减小边界对关注位置受力的影响,同时满足节段模型中钢梁段和混凝土梁段长不小于8倍结合段长的要求,符合《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)[21]中的相关规定,选取钢-混结合段及两侧附近适当范围内的梁段进行模拟计算. 其中,钢梁段取12.5 m长,混凝土梁段取13 m长,模型总长27 m. 模型中,钢结构采用4节点壳单元SHELL63模拟,混凝土和UHPC层采用8节点实体单元SOLID185模拟;预应力束采用杆单元LINK8模拟,用CEINTF命令将其与周围混凝土箱梁的单元建立约束方程.

无UHPC层和有UHPC层的两种有限元模型示意分别如图5(a)和图5(b)所示. 钢-混结合段有限元模型基本结构为悬臂梁,混凝土梁梁端截面(z=-14.5 m)设置为固定端,约束所有位移及转动;钢梁梁端(z=12.5 m)作为加载端,在截面形心处建立主节点,用CERIG命令使其与钢梁梁端节点形成刚域,在刚域主节点施加由第2节计算得到的弯矩和剪力荷载. 模型边界约束和加载方式如图6所示.



(a)无UHPC层钢-混结合段模型



(b)有UHPC层钢-混结合段模型

图5 ANSYS节段有限元模型

Fig.5 ANSYS segmental finite element models

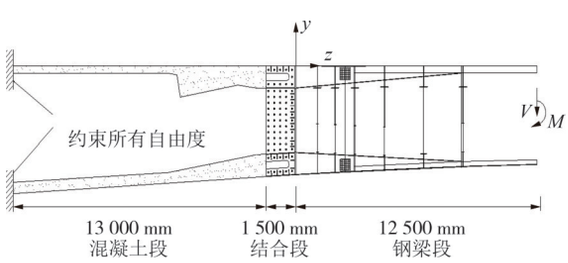


图6 节段模型边界约束和加载方式

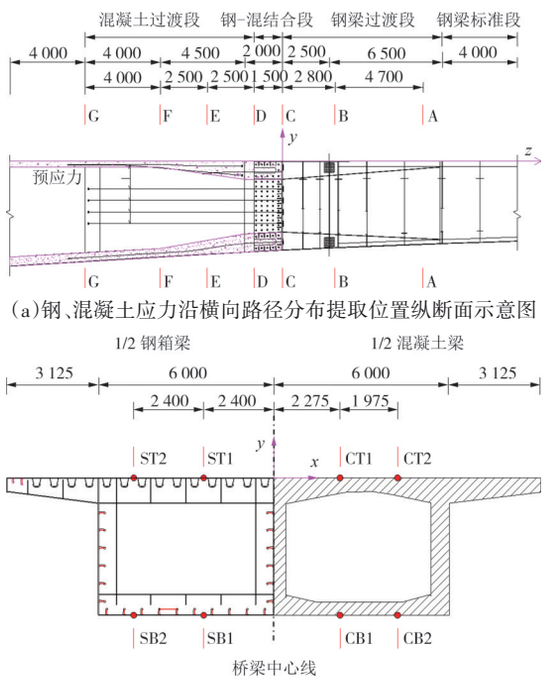
Fig.6 Boundary condition and loading scheme of segmental model

3.2 钢-混结合段的受力特性

3.2.1 钢-混结合段顺桥向正应力分布规律对比分析

为便于分析钢-混结合段及两侧过渡段的应力分布规律,在钢梁和混凝土梁的顶板和底板沿z轴方向在不同位置选取7个横向截面(顶/底板A~G),沿x轴方向在不同位置选取2个纵向截面(钢梁顶/底板ST1-SB1、ST2-SB2,混凝土顶/底板CT1-CB1、CT1-

CB2)作为应力提取路径,提取位置切面示意图分别见图7(a)(b). 在UHPC层的顶面、底面沿z轴方向在不同位置选择4个横向截面(顶/底面UT/UB-A~D),沿x轴方向在不同位置选取2个纵向截面(顶/底面UT1-UB1、UT2-UB2)作为应力提取路径,提取位置切面示意图见图7(c)(d). 各标号中字母S、C、U分别表示钢、混凝土和UHPC,字母T、B分别表示顶板和底板,字母后的数字1~2、A~G代表路径号.



(a)钢、混凝土应力沿横向路径分布提取位置纵断面示意图

(b)钢、混凝土应力沿纵向路径分布提取位置普通横断面示意图

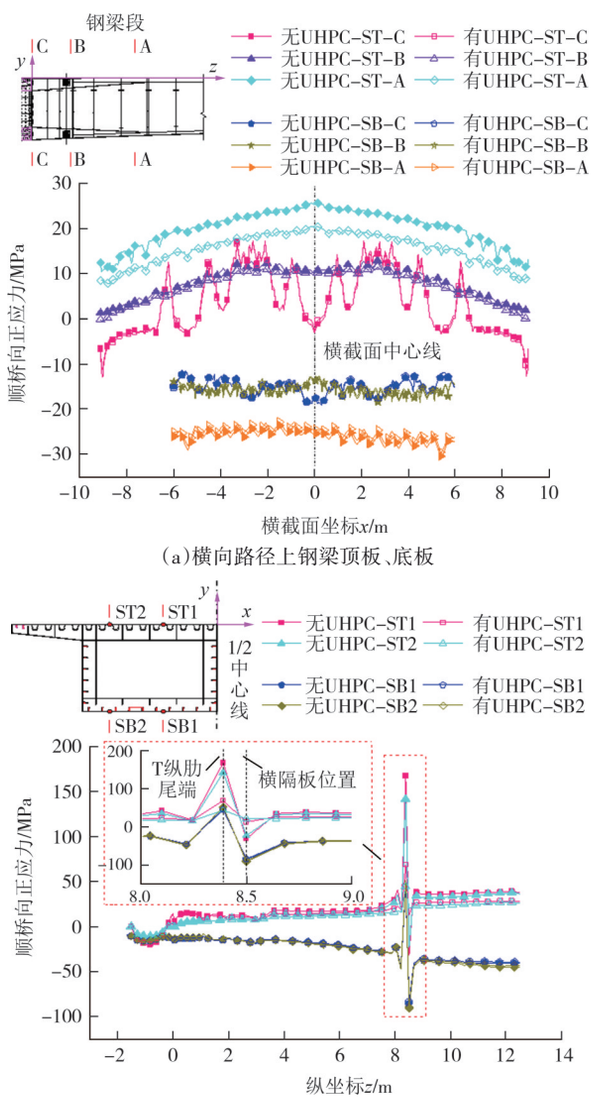
(c)UHPC应力沿横向路径分布提取位置纵断面示意图

(d)UHPC应力沿纵向路径分布提取位置普通横断面示意图

图7　应力提取路径切面示意图(单位:mm)

Fig.7　Section diagram of stress extraction path(unit:mm)

根据计算结果,混凝土梁、钢梁在各工况下的应力分布规律相似,且在工况二下受力更为不利. 因此,仅以工况二(最大负弯矩工况)为例进行分析,其横向和纵向路径上钢梁顶板、底板的顺桥向正应力见图8,横向和纵向路径上混凝土梁顶板、底板的顺桥向正应力见图9.



(a)横向路径上钢梁顶板、底板

(b)纵向路径上钢梁顶板、底板

图8　横向和纵向路径上钢梁顶板、底板顺桥向正应力

Fig.8　Longitudinal normal stresses on the top and bottom plates of steel girder along the transverse and longitudinal paths

由图8(a)可知,沿横向路径:1)在靠近结合段的截面(C-C截面),两种模型钢梁段的顶板应力相差不大,在远离结合段位置(A-A截面),有UHPC模型的应力下降明显,降幅最高达到36.8%;2)两种模型钢梁底板应力相差不大;3)钢梁顶板及结合段界面(C-C截面)处的钢梁顶板应力分布不均匀,剪力滞效应明显.

由图8(b)可知,沿纵向路径:1)钢梁顶板、底板均在钢梁过渡段与标准段的衔接部位的T纵肋尾端和横隔板位置(z=8.39 m)出现应力集中现象,与无UHPC模型的顶板应力集中167.9 MPa相比,有UHPC模型的顶板应力集中下降至68.9 MPa,大幅削弱了应力集中效应;2)不考虑应力集中区域,钢梁顶板的拉应力从钢梁过渡段到标准段呈线性增加,有UHPC模型的最大拉应力为28.8 MPa,相比无UHPC模型的38.9 MPa降低了26%;3)不考虑应力集中区域,钢梁底板从钢梁过渡段到标准段的拉应力也呈线性增加,有UHPC模型的最大拉应力为43.2 MPa,相较于无UHPC模型的45 MPa仅降低了4%,可见有无UHPC对其底板应力结果影响极小;4)沿纵向路径,钢-混结合段区域内(z=-11.5~0 m)钢梁顶板、底板基本处于受压状态,且应力不大于25 MPa.

由图9(a)可知,沿横向路径:混凝土顶板、底板均为受压状态,箱梁边缘应力较中间区域小,且在腹板和预应力位置,应力出现减小情况.

由图9(b)可知,沿纵向路径:1)在钢-混结合段交界面,出现局部应力集中现象,且混凝土顶板、底板应力在结合段两端(z=0、-1.5 m)均出现明显的应力变化,其原因是钢梁内力在承压板位置后(z<0 m),钢-混过渡段内力逐渐由混凝土承担;2)不考虑钢-混结合段受力影响区域,混凝土顶板、底板的顺桥向正应力随着远离结合段而逐渐增大,且大约在纵向6 m之后,变化平稳,这是因为混凝土过渡段在附近转变为标准段;3)钢-混结合段混凝土基本全截面受压,有UHPC对两个交界面(z=0 m、-1.5 m)附近区域应力影响较其他区域明显.对于顶板,在混凝土梁标准段(z>6 m),有UHPC的模型混凝土应力变化均在0.2%以内,而在靠近两个交界面附近区域,混凝土应力降幅最大达到了11.34%.对于底板,随着远离交界面(z=0 m),有UHPC的模型混凝土应力降幅从1.2%逐渐下降到0.09%.

3.2.2 钢-混结合段混凝土主应力分布规律对比分析

针对有UHPC和无UHPC两个模型,在横向C~G截面,纵向CT/CB1~2截面位置,分别提取钢-混结合段和混凝土梁段顶板、底板翼缘沿横桥向(x轴方向)和纵桥向(z轴方向)分布的一系列节点组的主应力,同样以工况二(最大负弯矩工况)为例进行分析,其横向和纵向路径上混凝土顶板、底板的主应力分布规律见图10.

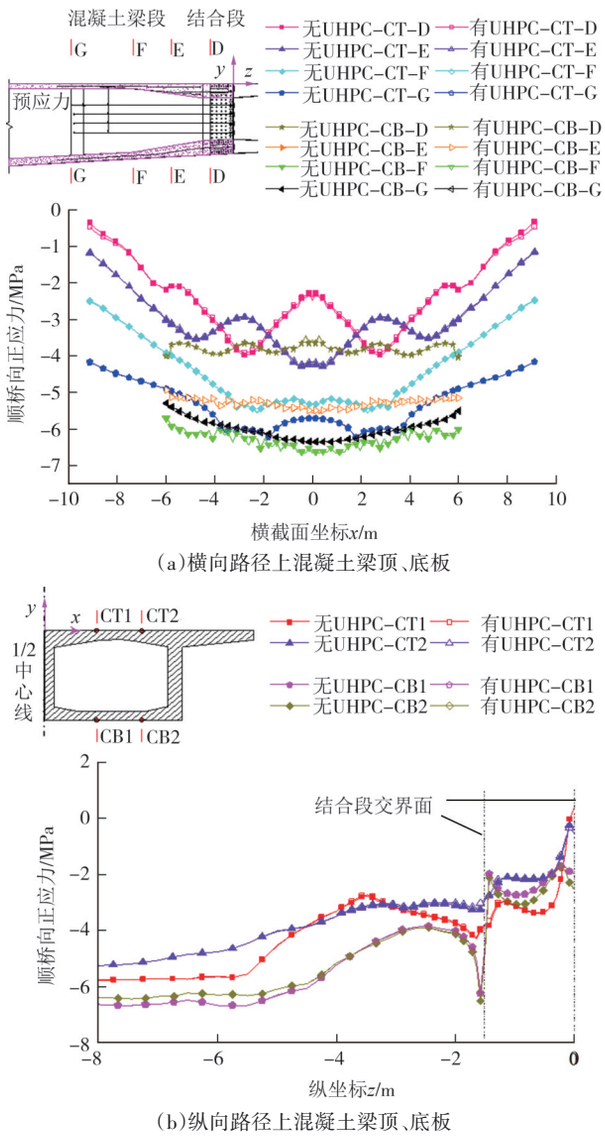
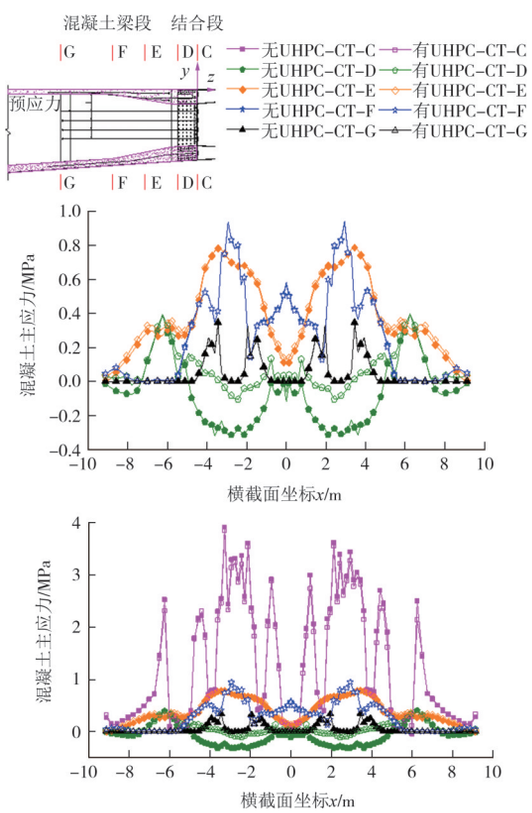


图9 横向和纵向路径上混凝土顶板、底板顺桥向正应力

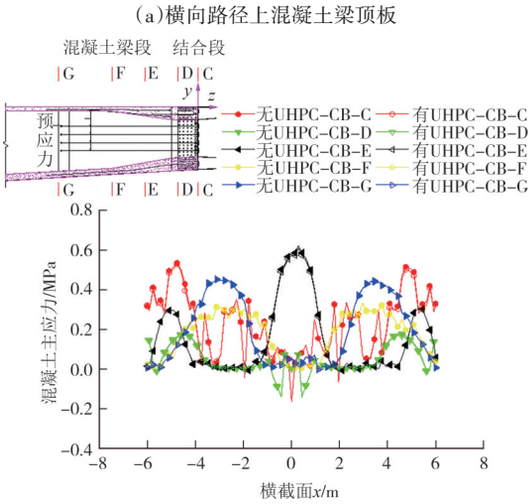
Fig.9 Longitudinal normal stresses on the top and bottom plates of concrete girder along transverse and longitudinal paths

由图10(a)可知,在均未铺设UHPC的E、F、G截面处,两个模型混凝土顶板主应力结果差异极小,但在上面铺设有UHPC的钢-混结合段交界面D截面,有UHPC模型的混凝土主应力出现较为明显的变化,应力幅值、主压应力均减小,箱梁室范围减小最为明显,而在箱梁边缘甚至出现应力反向.由图10(b)可知,有UHPC层和无UHPC层,对混凝土底板的主应力几乎无影响.由图10(a)和10(b)可知,沿横向路径:1)混凝土的主应力分布受边腹板和中腹板影响较大,在腹板处应力出现突变;2)预应力布置位置,混凝土主拉应力均出现明显下降现象;3)混凝土梁段的主应力均满足C55的抗拉强度设计值1.89 MPa

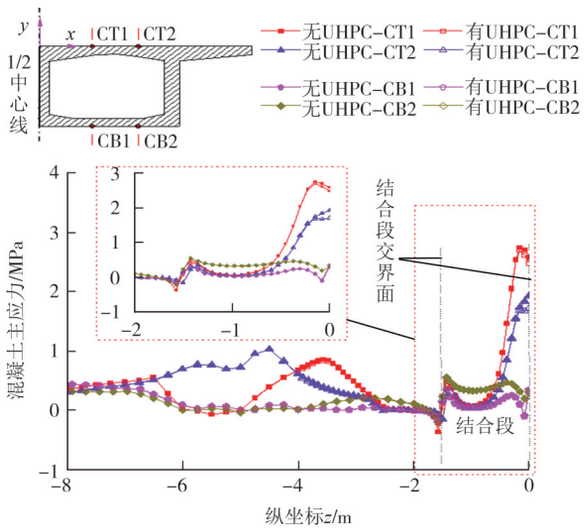
和抗压强度设计值24 MPa的要求,但在钢-混过渡段,交界面位置(C-C截面),出现应力波动,该截面位置,有UHPC模型相比无UHPC模型,主拉应力有一定的下降,幅度在0.89%~22.12%之间.该交界面位置,无UHPC、有UHPC模型的最大主拉应力分别为3.91 MPa和3.84 MPa,均超过C55抗拉强度设计值1.89 MPa,可见在极限受力状态,交界面存在一定的混凝土开裂风险,但该交界面存在承压板,为预应力锚固位置,且建模未考虑锚固装置,因此应力分布受到预应力影响,导致该截面应力集中的出现,在谢自畅[22]、黄荣[23]的研究中均有类似的情况及解释.



(a)横向路径上混凝土梁顶板



(b)横向路径上混凝土梁底板



(c)纵向路径上混凝土梁顶板、底板

图10　横向和纵向路径上混凝土顶板、底板主应力

Fig.10　Primary stresses on the top and bottom plates of concrete girder along transverse and longitudinal paths

由图10(c)可知,沿纵向路径:1)在结合段两个交界面附近区域,混凝土主应力存在突变情况;2)混凝土梁段,基本均处于主拉应力状态,且满足材料性能要求,但在钢-混结合段,极限受力状态下,靠近交界面承压板300 mm位置内,箱梁中空上的混凝土顶板主应力超过1.89 MPa,其原因是与交界面处横向分布类似,该处为预应力钢束锚固位置,受力复杂,而本文ANSYS模型中未考虑锚固装置,因此应力分布受到预应力影响,导致该截面应力集中的出现;3)有UHPC模型,在靠近交界面承压板300 mm位置内,对混凝土顶板主拉应力有微小的减小作用,减小幅度在0.25%~11.35%之间,越接近承压板位置,降幅越明显;4)有无UHPC对混凝土梁底板主应力影响不明显.

3.2.3　UHPC层受力分析

工况一和工况三下节段模型受正弯矩作用,因此UHPC层主要受压应力.由于UHPC的抗压强度设计值较高(62.3 MPa)[19],各工况计算得到的最大压应力仅为15.8 MPa,远低于其抗压强度设计值,因此UHPC抗压不控制设计.

结构在工况二和工况四下截面受负弯矩作用,UHPC层主要受拉应力.在工况二和工况四下,结合段UHPC层顶面的最大拉应力也仅为10.5 MPa,且仅出现在边界局部位置(见图11),其余区域最大拉应力为6.1 MPa,因此即使在承载能力极限状态下,

UHPC层的拉应力仍然低于其钢-轻型组合桥面结构中对应的配筋UHPC的名义弯拉应力容许值(26.8 MPa)[19],不会产生裂纹,具有较高的安全储备.在横向和纵向路径上UHPC顶面、底面的顺桥向正应力分布见图12(a)(b).

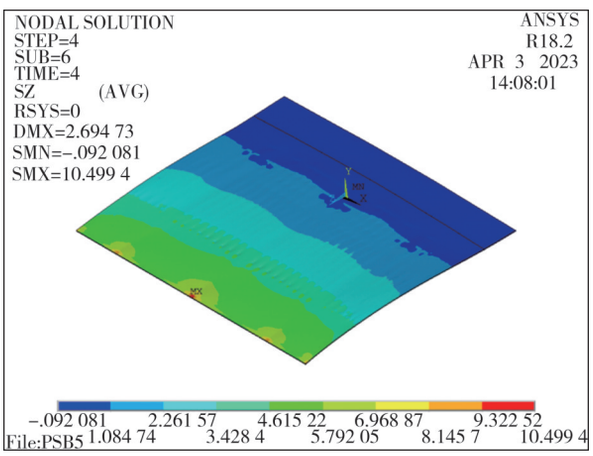


图11 最大负弯矩工况下UHPC层顺桥向应力

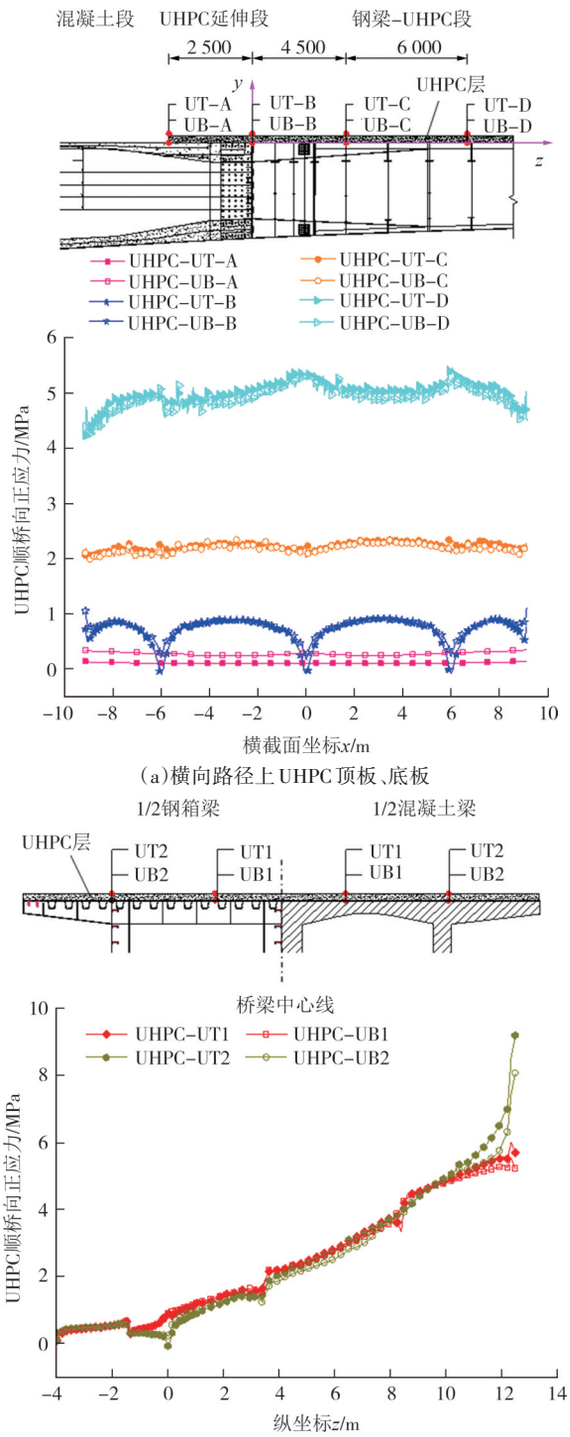
Fig.11 Longitudinal normal stress of UHPC layer under the maximum negative bending moment load case

由图12(a)可知,在横向应力路径:1)UHPC顶板、底板在最不利负弯矩工况下,全截面受拉;2)延伸至混凝土梁上UHPC的A截面,顶板和底板受力平稳;3)钢梁上的UHPC层应力分布存在剪力滞效应,在钢梁过渡段(B截面),剪力滞的存在使腹板处拉应力最小,且从腹板向两边逐渐增大,在钢梁标准段(D截面),应力在腹板处最大,且从腹板向两边逐渐减小;4)UHPC层应力,截面应力随着远离结合段而逐渐增加.

由图12(b)可知,在纵向应力路径:1)UHPC纵向应力随着纵坐标z的增加而大致呈线性增加;2)在钢-混结合段两个交界面、混凝土梁顶底板变截面位置,应力出现突变情况,因这些位置截面刚度发生较大变化;3)UHPC的最大应力出现在模型端部,为9.4 MPa,而钢-混结合段内的最大应力均小于6.1 MPa,均无开裂风险.

3.2.4 结合段弯矩分配情况对比

为进一步研究新型钢-混结合段内部的传力机理,在z=0~-1.5 m的钢-混结合段范围内沿纵桥向每75 mm取一个截面,共取20个截面;在指定结合段各钢-混凝土-UHPC组合截面的形心位置后,通过单元节点对指定点求和命令FSUM对节点力进行积分运算,从而获得每个截面的总弯矩及钢梁和混凝土梁各自承担的弯矩值,进而计算出钢梁和混凝土梁所承担的截面弯矩的比例α,并绘出α沿纵向变化曲线图.由于各工况的曲线图很相似,因此这里仅给出工况一的曲线图并进行讨论,如图13所示.



(a)横向路径上UHPC顶板、底板

(b)纵向路径上UHPC顶板、底板

图12 UHPC顺桥向应力横向和纵向分布

Fig.12 Longitudinal normal stresses on the top and bottom plates of UHPC layer along transverse and longitudinal paths

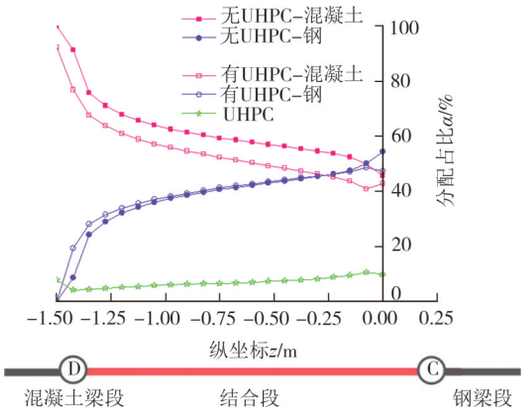


图 13　结合段弯矩分配比例沿纵桥向变化趋势

Fig.13　Trend of distribution proportion of bending moment in joint section along longitudinal direction

由图 13 可知,在 C 截面附近,钢梁和混凝土梁各自承担的比例接近,均在 50% 左右. 随着与 C 截面距离的增加,混凝土梁承担的弯矩比例逐渐上升,而钢梁承担的弯矩比例则逐渐下降,到达结合面 D 截面(z=−1.5 m)之后,钢梁承担弯矩的比例降为零. 分配占比 α 只在 C 截面和 D 截面附近变化较快,而在中间段则较平缓,由此可见,结合段内部的内力传递总体而言是比较顺畅的,且弯矩分配曲线的变化趋势与 3.2.2 节的应力纵向变化曲线趋势相似.

对比无 UHPC 和有 UHPC 模型的 α 曲线可知,由于 UHPC 层在结合段中贡献了 4.0%~10.9% 的截面弯矩,有 UHPC 模型中混凝土梁分担的截面弯矩减少了 2.8%~14.5%,而钢梁内力变化较小,大部分变化幅度小于 1%.

为了进一步探明钢-混结合段的传力特点,分别将结合段混凝土梁和钢梁划分为 3 个部分,然后计算各部分承担的弯矩与截面总弯矩的比例,其分配占比沿纵向的变化曲线分别如图 14 和图 15 所示. 图 16 给出了 z=−0.75 m 处无 UHPC 模型和有 UHPC 模型各部分详细的弯矩分配比例.

由图 14 可知:1)有 UHPC 和无 UHPC 两种模型,结合段各部分构造承担弯矩的占比变化趋势相似,混凝土顶板承担弯矩最多,其次是混凝土底板,最后才是腹板;2)对于无 UHPC 模型的混凝土顶板,随着从与钢梁交界 C 截面到与混凝土梁交界 D 截面(由 z=0 到 z=−1.5 m 的方向),其弯矩的承担占比逐渐上升,从 31.6% 上升至 75.2%,而采用 UHPC 后,混凝土顶板的弯矩承担占比下降了 4.4%~12.55%,降低了混凝土顶板的开裂风险;3)有 UHPC 对混凝土底板

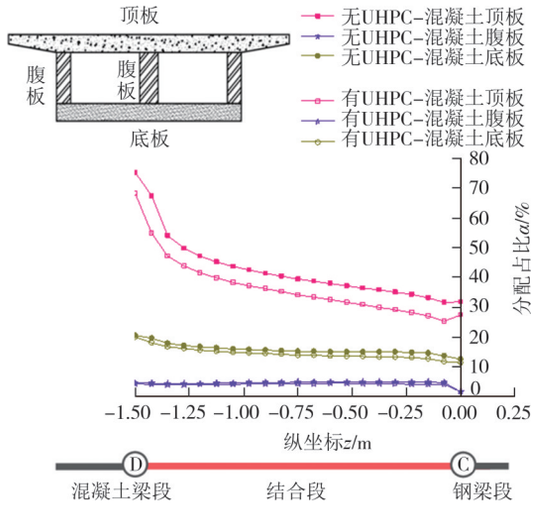


图 14　混凝土梁各部分占截面总弯矩比重

Fig.14　Ratio of each part of concrete girder to overall bending moment of section

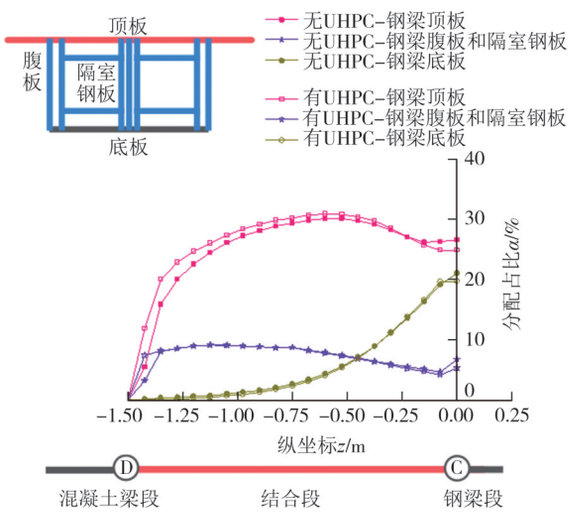


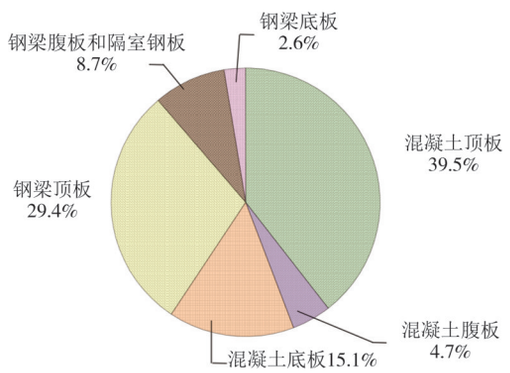
图 15　钢梁各部分占截面总弯矩比重

Fig.15　Ration of each part of steel girder to overall bending moment of section

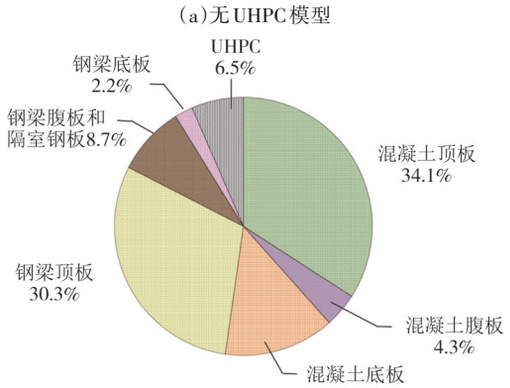
和腹板的弯矩占比降幅较小,底板只降低不到 2%,而腹板降低小于 1%.

由图 15 可知:1)有 UHPC 和无 UHPC 两种模型,结合段各部分构造承担弯矩的占比变化趋势相似,钢梁顶板弯矩承担最多,钢梁底板在靠近钢梁 0.5 m 内承担占比大于钢梁腹板和隔室钢板,但在 0.5 m 外直至与混凝土梁交界 D 截面,其占比不断减少且小于钢梁腹板和隔室钢板;2)靠近与钢梁交界 C 截面,有 UHPC 模型对钢梁各部分的弯矩承担占比均有所降低,但降幅在 1.3%~1.8% 以内;3)在距离 C 截面 250 mm 后直至与混凝土梁交界 D 截面(由 z=−0.25 m 到 z=−1.5 m 的方向),有无 UHPC 对钢梁底板、钢梁腹

板及隔室钢板的弯矩承担占比均无明显影响.而有UHPC模型的钢梁顶板,其弯矩承担占比反而有0.34%~6.43%微幅增加,这可能是因为UHPC层与钢梁顶板通过栓钉连接等的作用,加大了钢梁顶板参与结构受力而导致其弯矩承担比例有所增长.



(a)无UHPC模型



(b)有UHPC模型

图16 z=−0.75 m处弯矩分配比例

Fig.16 Distribution proportion of bending moment at location where z=−0.75 m

由图16可知,在结合段中间截面(z=−0.75 m):1)承担弯矩最多的是混凝土顶板,其次是钢梁顶板,然后是混凝土底板及钢梁腹板和隔室钢板,混凝土腹板和钢梁底板承担比例均不大,在采用UHPC后,UHPC的弯矩承担占比为6.5%;2)无UHPC模型和有UHPC模型的钢梁腹板和隔室钢板弯矩占比没有变化,而有UHPC模型的钢梁顶板弯矩占比增加了0.9百分点,钢梁底板弯矩占比减少了0.4百分点,变化较小,可见在靠近钢梁段的钢-混结合段区域(C截面z=0 m至z=−0.75 m),UHPC对钢梁的受力影响不大;3)采用UHPC后,混凝土底板的弯矩承担比例下降了1.2百分点,混凝土腹板的弯矩承担比例下降了0.4百分点,混凝土顶板的弯矩承担比例下降了5.4百分点,可见UHPC的采用对混凝土顶板的影响最大,可以较明显地减少结合段混凝土顶板的受力,降低开裂风险.

4 结 论

本文以山东滨州黄河大桥为工程背景,对大跨多跨PC与钢-UHPC混合式连续梁桥的钢-混结合段进行了有限元计算,研究了UHPC层对钢-混结合段受力性能的影响规律,以及有UHPC层和无UHPC层模型的钢-混结合段传力机理,主要结论如下:

1)在设计荷载作用下,整体结构计算钢-混结合段的混凝土梁和钢梁各构件的应力均小于设计值,满足设计要求.

2)钢-混结合段内力传递较为平顺,在钢梁和结合段交界面处,钢梁和混凝土梁约各承担50%的弯矩,在混凝土梁和钢梁交界面处,所有弯矩都由混凝土梁承担;钢梁和混凝土梁的弯矩分配比例在结合段的两个交界面处变化较为明显,而在结合段中段变化则比较平稳.

3)UHPC层能承担约4%~10.9%的截面弯矩,降低了钢梁和混凝土梁的受力负担.钢梁顶板最大拉应力由无UHPC模型的167.9 MPa下降至有UHPC模型的68.9 MPa,UHPC的采用大幅降低了应力集中效应,能明显延长钢结构的疲劳寿命,同时,有UHPC模型降低结合段混凝土梁顶板应力约5%~20%,有利于提高结构顶板构造的抗裂性能.

4)在极限承载能力状态下,在非模型边界邻近区域的UHPC层的最大纵向压应力为15.8 MPa,最大拉应力为6.1 MPa,小于规范[19]中UHPC抗拉容许值,满足抗裂设计要求.因此有UHPC层的钢-混结合段具有较高的安全储备,运营中不会产生裂缝,有利于防止钢混段界面出现开裂、渗水等问题,提高桥梁结构的安全性和耐久性.

参考文献

[1] 齐东春,张永水,李强. 大跨径连续刚构桥跨中下挠的成因及对策[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2007,26(6):46-49.
QI D C, ZHANG Y S, LI Q. Reason analysis and countermeasures for excessive deflection of midspan in long-span continuous rigid frame bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2007,26(6):46-49.(in Chinese)

[2] 张鹏. 钢-混凝土混合梁结合段受力性能与设计参数研究[D]. 西安:长安大学,2012:4-19.
ZHANG P. Study on mechanical properties and design parameters of steel-concrete mixed beam joint section[D]. Xi'an:Chang'an

University,2012:4-19 (in Chinese).

[3] 王法武,石雪飞. 大跨径预应力混凝土梁桥长期挠度控制分析[J]. 上海公路,2006(1):29-32.
WANG F W,SHI X F. Study on long-term deflection control of large span prestressed concrete girder bridge [J]. Shanghai Highways,2006(1):29-32.(in Chinese)

[4] 邵旭东,胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京:人民交通出版社,2015:10-14,80-95.
SHAO X D, HU J H. The steel-UHPC lightweight composite bridge structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2015:10-14,80-95.(in Chinese)

[5] SHAO X D,YI D T,HUANG Z Y,et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5):417-428.

[6] 邵旭东,张哲,刘梦麟,等. 正交异性钢-RPC组合桥面板弯拉强度的实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2012,39(10):7-13.
SHAO X D, ZHANG Z, LIU M L, et al. Research on bending tensile strength for composite bridge deck system composed of orthotropic steel deck and thin RPC topping [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(10): 7-13. (in Chinese)

[7] 李文光,邵旭东,方恒,等. 钢-UHPC组合板受弯性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(11):93-102.
LI W G, SHAO X D, FANG H, et al. Experimental study on flexural behavior of steel-UHPC composite slabs[J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(11):93-102.(in Chinese)

[8] 邵旭东,罗军,曹君辉,等. 钢-UHPC轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. 土木工程学报,2019,52(3):61-75.
SHAO X D, LUO J, CAO J H, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 61-75.(in Chinese)

[9] 罗军, 邵旭东, 曹君辉, 等. 钢-超高性能混凝土组合板开裂荷载正交试验及计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(5):909-920.
LUO J, SHAO X D, CAO J H, et al. Orthogonal test and calculation method of cracking load of steel-ultra-high performance concrete composite specimen [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(5): 909-920.(in Chinese)

[10] 王立国,邵旭东,曹君辉,等. 基于超短栓钉的钢-超薄UHPC组合桥面性能[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(10):2027-2037.
WANG L G,SHAO X D,CAO J H,et al. Performance of steel-ultrathin UHPC composite bridge deck based on ultra-short headed studs[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2020,54(10):2027-2037.(in Chinese)

[11] CHENG X,NIE X,FAN J S. Structural performance and strength prediction of steel-to-concrete box girder deck transition zone of hybrid steel-concrete cable-stayed bridges[J]. Journal of Bridge Engineering,2016,21(11): 04016083.

[12] 何伟兵,刘玉擎,汪蕊蕊. 九江长江公路大桥混合梁结合段构造分析[J]. 桥梁建设,2012,42(1):30-35.
HE W B, LIU Y Q, WANG R R. Analysis of joint section structure of hybrid girder of Jiujiang Changjiang River highway bridge [J]. Bridge Construction, 2012, 42 (1): 30-35. (in Chinese)

[13] 邓文中,代彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J]. 桥梁建设,2006,36(6):28-32.
DENG W Z, DAI T. Overall design of double-line bridge of Shibanpo Changjiang River Bridge in Chongqing [J]. Bridge Construction,2006,36(6):28-32.(in Chinese)

[14] 王军文,倪章军,李建中,等. 石板坡长江大桥钢混结合段局部应力分析[J]. 公路交通科技,2007,24(8):99-102.
WANG J W, NI Z J, LI J Z, et al. Analysis on local stress of steel-concrete beam linked part of Shibanpo Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8): 99-102.(in Chinese)

[15] 胡建华, 蒲怀仁. PBL剪力键钢混结合段设计与试验研究[J]. 钢结构, 2007, 22(2): 62-68.
HU J H, PU H R. Design and test of the joint part of steel-concrete girder bridge with PBL shear connector [J]. Steel Construction,2007,22(2):62-68.(in Chinese)

[16] 贺绍华. 混合梁斜拉桥高性能钢混结合段受力性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
HE S H. Experimental study on mechanical behavior of high performance steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridge[D]. Changsha:Hunan University,2017.(in Chinese)

[17] 周阳,蒲黔辉,施洲,等. 铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段传力及疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(11):77-83.
ZHOU Y, PU Q H, SHI Z, et al. Study on mechanics behavior and fatigue performance of steel-concrete composite joints of railway hybrid girder cable-stayed bridges [J]. China Civil Engineering Journal,2015,48(11):77-83.(in Chinese)

[18] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:1-52.
General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 1-52.(in Chinese)

[19] 钢-超高韧性混凝土轻型组合结构桥面技术规范: DB43/T 1173—2016[S]. 长沙: 湖南省质量技术监督局, 2016: 5-9.
Technical specification for steel-stc lightweight composite structure deck: DB43/T 1173—2016 [S]. Changsha: Hunan Province Municipal Bureau of Quality and Technology Supervision, 2016: 5-9.(in Chinese)

[20] 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:8-13.
Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 8-13. (in Chinese)

[21] 公路钢混组合桥梁设计与施工规范:JTG/T D64-01—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:47.
Specifications for design and construction of highway steel-concrete composite bridge: JTG/T D64-01—2015[S]. Beijing: China Communications Press,2015:47.

[22] 谢自畅. 铁路钢混刚构-连续梁桥钢-混结合段静力行为及模型试验方案设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
XIE Z C. Study on static behavior and model test scheme design of steel-concrete joint section of railway steel-concrete rigid frame-continuous beam bridge[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2021.(in Chinese)

[23] 黄荣. 大跨度高速铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段静力力学性能及模型试验方案研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
HUANG R. Study on static mechanical properties and model test scheme of steel-concrete joint section of long-span high-speed railway hybrid beam cable-stayed bridge[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.(in Chinese)