文章编号:1674-2974(2026)03-0016-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026020

预制拼装UHPC节段薄壁箱梁抗弯性能

赵华[1,2],罗穗[1,2†],胡俊德[1,2],罗梓豪[1,2],钱煌果[3],廖志练[3],扈振涛[4]
(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;
3. 英德市公路事务中心,广东 英德 513099;
4. 清远市交通运输局,广东 清远 511500)

摘 要:为研究预制拼装UHPC节段薄壁箱梁桥的抗弯性能,以一座102 m跨径的节段拼装体外预应力UHPC薄壁箱梁桥为基础,通过对实际桥梁薄壁箱梁截面进行工字形截面等效处理,对3片节段梁(3∶20的体外预应力UHPC节段梁)开展四点弯曲试验,研究了不同胶接缝形式对节段梁抗弯性能的影响,获得了破坏模式、接缝张开宽度、挠度等相关试验结果.试验结果表明,节段梁的主要薄弱位置为接缝及其附近区域,其余位置的UHPC基体几乎无裂缝.提出了UHPC节段箱梁刚度的计算模型,该模型能够较为准确地预测UHPC节段箱梁的刚度.本研究可为UHPC节段薄壁箱梁桥的推广与发展提供参考,丰富体外预应力胶接缝UHPC节段梁的计算理论.

关键词:桥梁工程;UHPC薄壁箱梁;节段梁;抗弯性能
中图分类号:U448.27 **文献标志码**:A

Flexural performance of precast assembled UHPC segmental thin-walled box girder

ZHAO Hua[1,2], LUO Sui[1,2†], HU Junde[1,2], LUO Zihao[1,2], QIAN Huangguo[3], LIAO Zhilian[3], HU Zhentao[4]
(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. Yingde City Highway Affairs Center, Yingde 513099, China;
4. Qingyuan Traffic and Transportation Bureau, Qingyuan 511500, China)

Abstract: To investigate the flexural performance of precast assembled UHPC segmental thin-walled box girder bridges, this study is based on an externally prestressed UHPC segmental thin-walled box girder bridge with span length of 102 m. The cross-section of the actual bridge's thin-walled box girder is equivalently modeled as an I-section. Subsequently, a four-point bending tests were conducted on three 3∶20 externally prestressed UHPC segmental beams to study the effect of different glued joint types on the flexural performance of the segmental beams, and the failure modes, joint opening width, deflection, and other related test results were obtained. The experimental results indicate that the main cracks in the segmental beams occur near the joints, with almost no

* **收稿日期**:2025-01-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278179),National Natural Science Foundation of China (52278179)
作者简介:赵华(1975—),男,湖北松滋人,湖南大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: luosui94@hnu.edu.cn

cracks observed within the UHPC matrix itself. A calculation model for the stiffness of UHPC segmental box girders is proposed, which can accurately predict the stiffness of segmental box girders. This study provides valuable references for the further promotion and development of UHPC segmental thin-walled box girder bridges and enriches the calculation theories for externally prestressed glued joint UHPC segmental beams.

Key words: bridge engineering; UHPC thin-walled box girder; segmental beam; flexural performance

预应力混凝土(prestressed concrete, PC)箱梁桥由于其构造简单、经济实用,在跨径为60~200 m的桥梁建设中具备较强的竞争力,已成为我国桥梁建设的主流桥型[1].然而,现有研究与工程实践表明,许多在役的PC箱梁桥普遍存在主梁过度下挠和梁体开裂等问题[2].以湖北钟祥汉江大桥为例,该桥于1993年建成通车,主跨100 m,服役仅12年便出现了严重的主跨下挠和梁体开裂,致使桥梁重建[3].类似的问题也出现于黄石长江公路大桥和虎门大桥辅航道桥,前者通车7年后,主跨发生了约335 mm的下挠并伴随大量裂缝[4],后者则于通车7年后主跨出现了220 mm的下挠并伴随大量裂缝[5].交通运输部对全国约180座主跨超过60 m的PC箱梁桥进行了调查[6],发现几乎所有PC箱梁桥都存在不同程度的下挠和开裂问题,且这两种现象往往同时发生并互相影响[7].

上述问题主要归因于传统普通混凝土(normal concrete, NC)的材料性能局限[2].NC的收缩与徐变使桥梁主跨下挠几乎不可避免[8-9],而其较低的抗裂能力则使得桥梁在建成后容易发生裂缝[9].这些问题不仅影响了桥梁的长期使用性能,也对桥梁的安全性和耐久性构成了严重威胁.

为解决上述问题,基于超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC),作者团队开发了单向预应力UHPC薄壁箱梁体系[1-2,10],并在此基础上开展了大量试验研究.试验结果表明,蒸养后的UHPC箱梁体系收缩基本完成,徐变系数较小,能够有效减缓主跨下挠问题[10].同时,由于UHPC材料优异的抗裂性能,箱梁腹板的抗剪性能显著提升[11].此外,团队还对该体系的桥面板、预应力锚固区、箱梁扭转畸变、接缝抗剪性能等方面进行了详细的试验与理论研究[12-15].

上述研究在一定程度上推动了UHPC箱梁桥的发展,但有关UHPC节段梁的抗弯性能的研究较少.Ye等[16]进行了7个节段试件的试验,研究了带有外部预应力筋和环氧接缝的预制UHPC T梁在弯剪复合作用下的力学性能,结果表明,与整体梁相比,节段梁往往表现出更好的延性和变形能力.梁雪娇[17]开展了5片UHPC节段预制矩形梁的弯曲试验,发现多齿键构件比同条件下单齿键构件承载力低4.5%,平接缝比多齿键构件承载力又低5.7%.李立峰等[18]通过多个试件探讨了带有环氧接缝的预制UHPC节段T梁的弯曲行为,发现裂缝通常出现在接缝处,而在节段内的UHPC表面未见明显裂缝,并对开裂和弯曲承载力的计算进行了讨论.然而,与仅有翼缘板的T梁或矩形梁不同的是,薄壁UHPC箱梁的底翼缘和顶翼缘将共同承担弯矩,导致其承载机制更为复杂.因此,深入研究UHPC箱梁构造的抗弯性能对改进大跨UHPC箱梁桥的设计和应用至关重要.因此,在前期研究的基础上,本文以一座已完工的预制拼装UHPC薄壁箱梁桥为例,对箱梁截面进行了工字形截面等效转换,设计了3组不同胶接缝形式的节段梁进行抗弯性能试验研究.通过对节段梁破坏过程分析,提出了基于试验现象的UHPC节段薄壁箱梁刚度计算模型,丰富了该类型桥梁的试验数据与理论分析方法.

1　102 m预应力UHPC节段薄壁箱梁桥

广东省英德北江四桥引桥采用了单跨102 m的预制拼装UHPC薄壁箱梁简支梁体系,如图1所示.该桥在横桥向由4个设置密集横隔板的UHPC箱梁组成,相同车道方向的箱梁之间采用现浇UHPC湿缝连接.UHPC箱梁沿纵向分为25个预制节段,其中2个端部箱梁长5 m,其余23个标准段长度为4 m.跨中箱梁底板厚度为16 cm,顶板和腹板厚度均为20 cm;端部箱梁顶板厚度35 cm,底板厚度31 cm,腹板厚度30 cm.箱梁顶宽8.825 m,底宽6 m,外悬臂长1.5 m,内悬臂长1.325 m.沿桥梁纵向在箱梁内每4 m设置一道16 cm厚横隔板.每个UHPC箱梁均配置

28束规格为24φˢ15.2的体外预应力束.

采用预制拼装UHPC薄壁箱梁简支梁体系,即可避免在水渠处设置桥墩,预留足够的桥下净空以供防洪大堤车辆通过,又能大幅缩短施工周期,保证施工质量.该桥已于2022年建成通车,建成时是世界最大跨径(单跨102 m),亦是全国首座单向预应力UHPC薄壁箱梁公路简支梁桥.

2 试验研究

桥梁建设前期,课题组根据实际桥梁设计了一组1∶4的试验模型以验证该桥的实际工作性能[19].该试验结果表明,节段预制UHPC薄壁箱梁体系接缝位置及其附近容易产生开裂的现象,其抗裂能力相对比较薄弱,因此,有必要探讨不同胶接缝形式对UHPC薄壁节段箱梁抗弯性能的影响.

2.1 试验梁设计

李国平等[20-21]在研究预制混凝土箱梁的受力性能时,基于截面中性轴位置基本不变、上翼缘板面积和截面面积基本相等的原则,将箱梁截面等效为工字形截面.受限于大规模箱梁试验的难度和成本,本文试验也采用类似的等效方式,将英德北江四桥UHPC箱梁截面等效为工字形截面(图2),等效后的截面特性如表1所示.

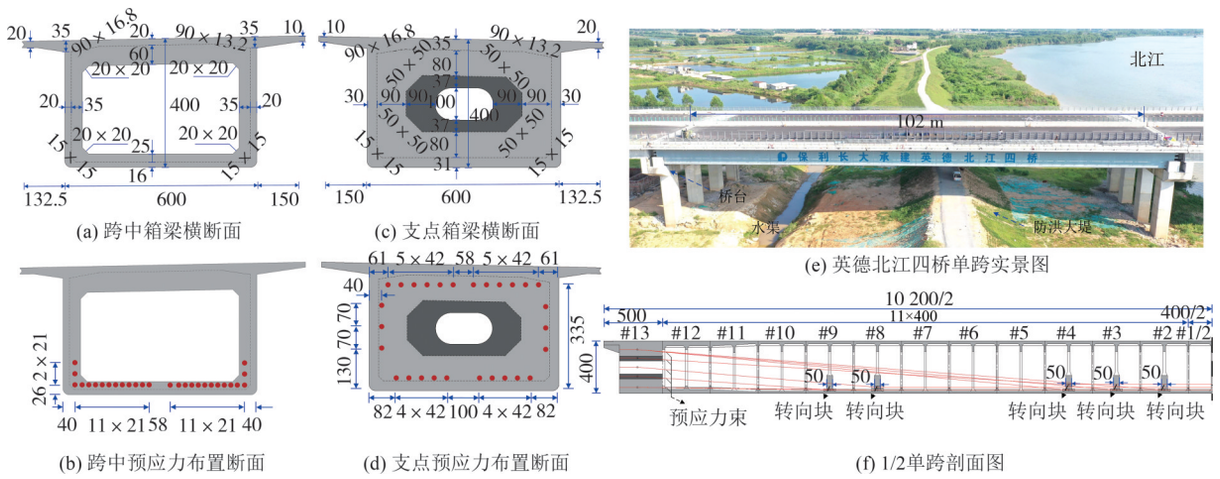


图1 英德北江四桥(102 mUHPC箱梁桥)示意图(单位:cm)

Fig.1 102 m UHPC box-girder bridge of the Yingde 4th Beijiang River Bridge (unit: cm)

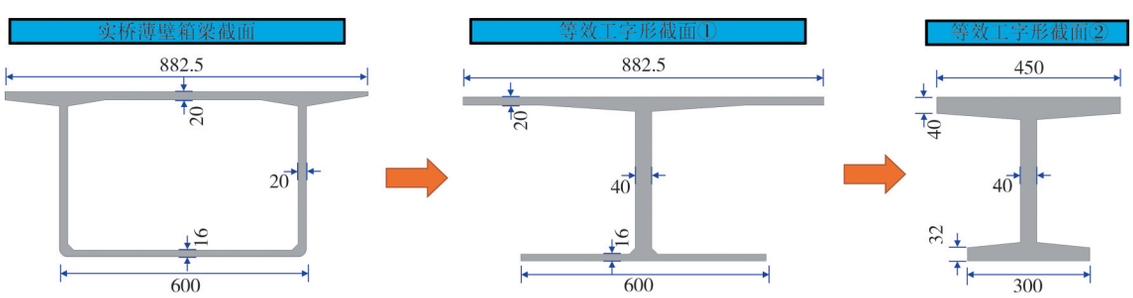


图2 截面等效(单位:cm)

Fig.2 Cross-section equivalences (unit: cm)

表1 等效截面基本参数

Tab.1 Basic information of equivalent section

截面类型	抗弯惯性矩 I/cm^4	形心高度 h/cm	截面面积 A/cm^2
实桥截面	1 145 021 245	242.6	44 213
等效工字形截面②	1 100 521 341	235.6	46 070

以等效工字形截面②为研究对象,共设计3根不同胶接缝形式的3∶20缩尺模型试件.如图3所示,试件总长4 400 mm,计算跨径为4 250 mm.所有试件均配置φˢ15.2的钢绞线,在底板受拉区设置4根预应力束(SB1~SB4),并在转向隔板处进行转向,其中SB1与SB4的转向角度为2°,SB2与SB3转向角度为4.9°.为避免底板预应力张拉时,顶部受压区UHPC出现受压区开裂,在顶板设置2根预应力束(ST1、ST2).为保证试验过程中发生抗弯破坏,腹板采用直径16 mm的箍筋.试件的详细设计参数如表2所示.

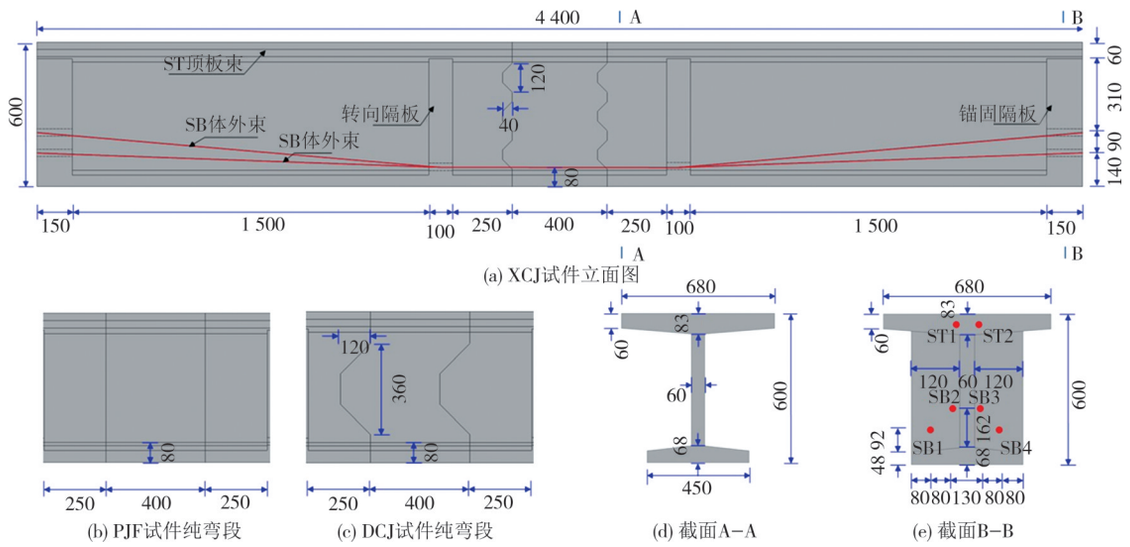


图 3　试件构造图(单位:mm)

Fig.3　Details of specimens (unit:mm)

表 2　试件信息

Tab.2　Information of specimens

编号	初张力/kN		胶接缝形式	接缝数量
	ST	SB		
PJF	104.1	159.9	平接缝	2
DCJ	106.3	161.2	大齿键	2
XCJ	104.4	140.7	小齿键	2

注:张拉力取各组预应力的均值.

2.2　试件制作及材料性能

试件制作流程如图 4 所示.在 UHPC 浇筑完成后,用塑料薄膜覆盖试件表面以减少水分流失,自然养护 48 h 后拆模,然后对试件进行 95 ℃高温蒸汽养护.养护完成后在试件接缝处均匀涂抹 1~3 mm 的结构胶,通过临时对拉螺杆来实现预制节段拼装预紧,确保接缝处胶接材料在不小于 0.3 MPa 的压应力下固化.试件静置 24 h,待结构胶达到强度后拆除对拉螺杆,然后将试件架设在支座上完成预定预应力张拉,预应力初始张拉值见表 2. 试件制作的同时,按规范[22]分别浇筑了弹性模量(100 mm×100 mm×300 mm)、抗压(100 mm×100 mm×100 mm)和抗折(100 mm×100 mm×400 mm)强度试块,其养护条件与试件一致.此外,预应力钢绞线采用武汉钢铁江北集团金属制品有限公司生产的 φ^{s}15.2 预应力钢束.试件采用的钢筋均为 HRB400,纵筋和腹筋的直径分别为 12 mm 和 16 mm,钢材力学性能由拉伸试验[23]得到,结构胶材料性能由厂家提供.各材料的力学性能如表 3、表 4 所示.

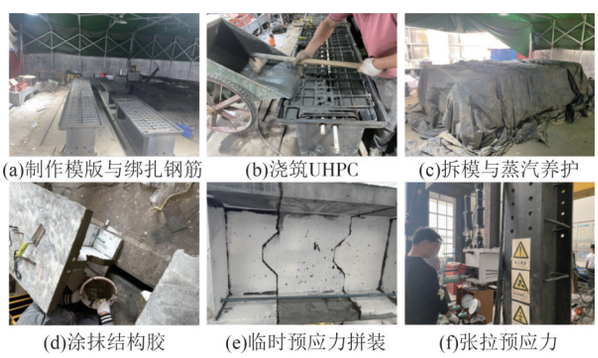


图 4　试件制作流程

Fig.4　Construction progress

表 3　UHPC 力学性能

Tab.3　Mechanical properties of UHPC

弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	轴心抗拉强度/MPa
45.1	152	18.7	7.5

表 4　材料力学性能

Tab.4　Mechanical properties of material

材料类别	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
钢绞线	195	456	606
HRB400	201	1 688	1 860
结构胶	10.6	—	8.8

2.3　加载与测试系统

试件采用四点弯曲加载,纯弯段长 1 000 mm,接缝均处于纯弯段内(图 5). 为了防止局部破坏,在端隔板和预应力锚头之间垫尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm 的钢板. 通过 200 t 液压千斤顶与分配梁实现对试件的两点集中荷载,并在千斤顶和分配梁之间

布置传感器记录荷载.加载前期按力控制分级加载(每级 20 kN),试件开裂后采用位移控制加载(控制位移为每级 1 mm),直至破坏.



图 5 现场加载图

Fig.5 Loading test

试验采用无接触测量的方式,其中千斤顶荷载、试件位移由 HBM 数据采集系统进行记录,应变采用东华数据采集系统实时采集.此外,本次试验采用数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术对纯弯段内西侧和底面的 UHPC 位移场和接缝张开情况进行观测.无接触式测试系统以 1 Hz 频率对所有数据进行连续收集.

3 主要试验结果

3.1 失效模式及破坏过程

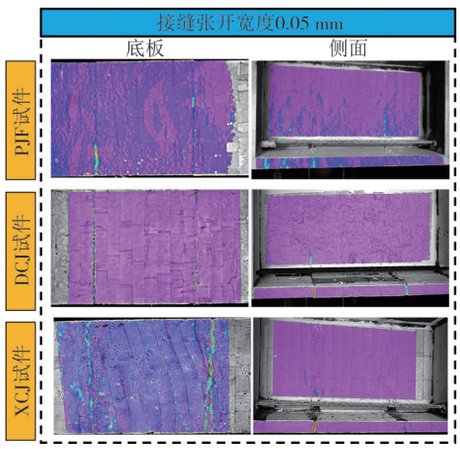
表 5 列出了关键试验结果,包括开裂荷载、极限荷载、极限荷载对应跨中挠度以及破坏模式.此外,各试件破坏裂缝开展过程如图 6 所示,图 7 给出了试件最终破坏形态.

表 5 主要试验结果

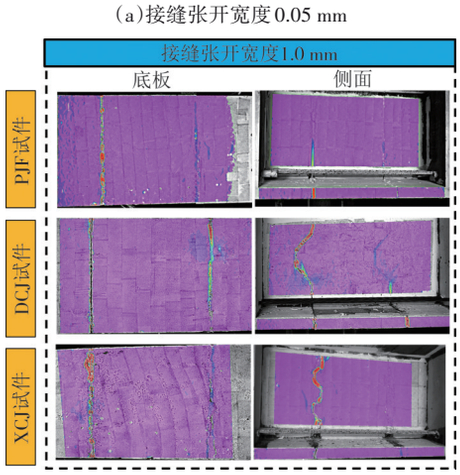
Tab.5 Main test results

试件编号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	最大挠度/mm	破坏模式
PJF	331.9	581.3	65.8	钢绞线拉断
DCJ	325.1	582.1	49.5	钢绞线拉断
XCJ	275.6	557.5	57.8	钢绞线拉断

各胶接缝节段梁试件的受力过程基本一致,当荷载 P=0.55P_u 时(P_u 为极限荷载),北侧接缝处的结构胶微微张开,可以观测到 0.05 mm 的裂纹;随着荷载继续增加,接缝张开宽度快速增长至 0.2 mm,并逐渐向腹板延伸,此时 P=0.6P_u,试件的刚度开始下降(图 8),并定义该点为节段梁的开裂/接缝张开荷载



(a)接缝张开宽度 0.05 mm



(b)接缝张开宽度 1 mm

图 6 接缝张开过程

Fig.6 Development of joints open

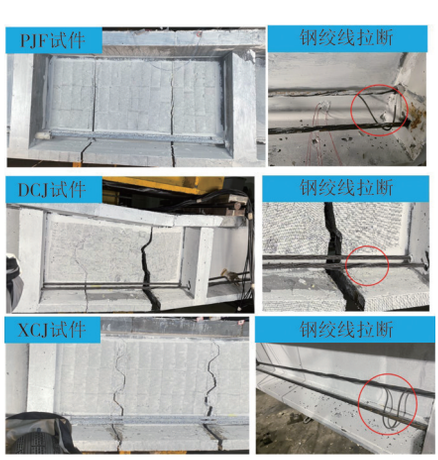


图 7 各试件破坏模式

Fig.7 Failure modes of specimens

(P_{cr}).继续增加荷载,南侧的接缝也开始张开,荷载增长速率逐渐下降,当 P=0.7P_u 时,最大接缝宽度达到 1 mm,此时腹板处结构胶的黏结作用基本失效.随着加载继续,接缝进一步张开,荷载缓慢增加.当荷载达到峰值时,所有试件的钢绞线被拉断.值得注意的是,得益于 UHPC 优异的抗裂性能,加载过程中

在UHPC基体内并未发现正截面裂缝.

3.2　荷载-位移曲线

图8给出了节段梁的荷载-位移曲线,可以将该曲线细分为①线弹性阶段、②接缝张开阶段、③强化阶段等三个阶段.对于节段梁的三个阶段,其试验现象如下.①线弹性阶段:3组节段梁试件的荷载位移曲线几乎重叠,各试件在开裂前的刚度几乎一致.②接缝张开阶段:该阶段荷载-位移曲线出现明显拐点,在接缝处可以观测到较为明显的张开现象,此时,荷载约为0.6P_u,裂缝宽度为0.2 mm,且随着荷载的增大,张开的幅度越大.值得注意的是,配置大齿键的DCJ试件,在该阶段展现出了最高的刚度,其余各节段梁试件的刚度基本保持一致,结合图9(在同一级荷载下,DCJ试件接缝张开宽度最小)表明,大齿键对接缝张开有一定的限制作用.③强化阶段:DCJ试件相较于其余两组试件展现出较为明显的强化阶段,3片试件不仅破坏模式相同,最终的峰值荷载也都在570 kN附近,这说明UHPC节段梁纯弯段的胶接缝形式对承载力的影响并不显著.

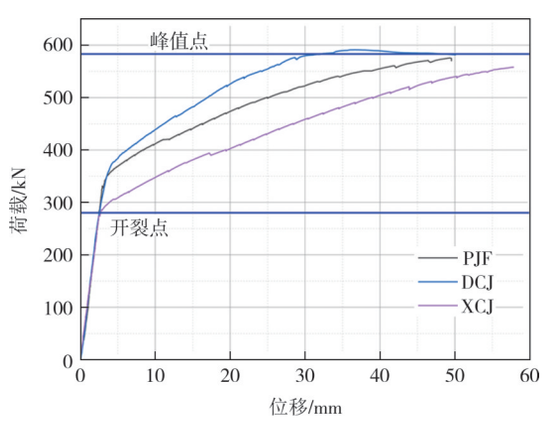


图8　荷载-位移曲线

Fig.8　Load-displacement curves

3.3　接缝响应

如图9所示,当试件开裂之后,节段梁的最大接缝张开宽度曲线展现出了细微的差异.在同级荷载下,XCJ试件裂缝宽度稍大.当裂缝宽度达到20 mm左右,荷载几乎不再增加.各节段梁的曲线发展规律基本一致,在同级荷载下,DCJ试件表现出了较强的限制接缝宽度张开的能力.图10还给出了跨中位移-最大接缝张开宽度的曲线,可以看出,接缝的张开宽度与跨中位移基本呈正相关关系.在加载后期,各组试件跨中挠度相同时,DCJ试件对应的接缝张开宽度要大于其余两组试件.

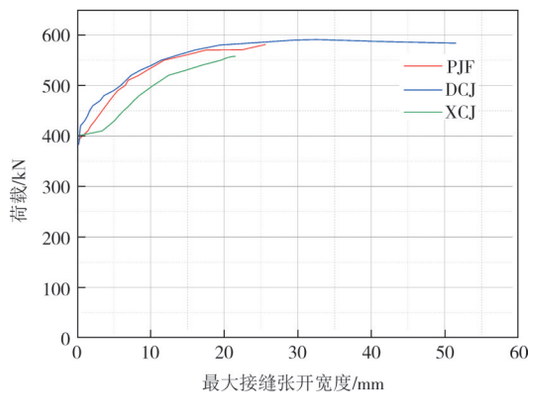


图9　荷载-最大接缝张开宽度曲线

Fig.9　Load-maximum joint opening width

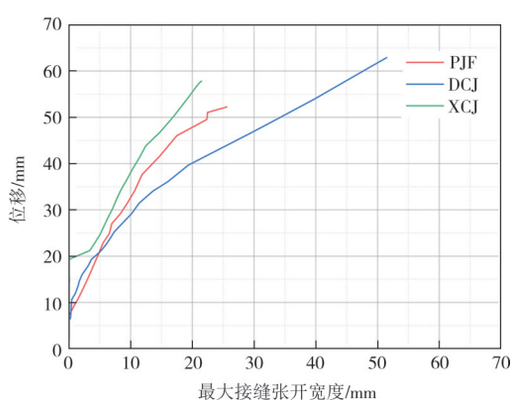
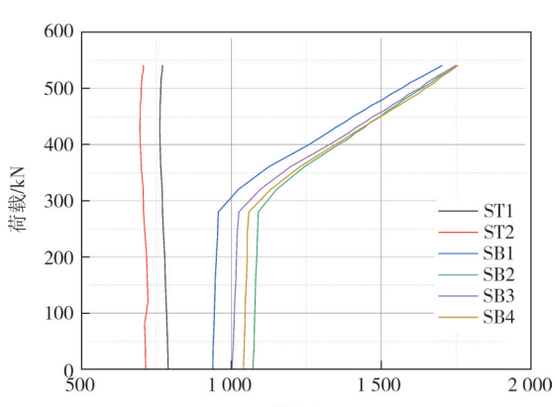


图10　位移-最大接缝张开宽度曲线

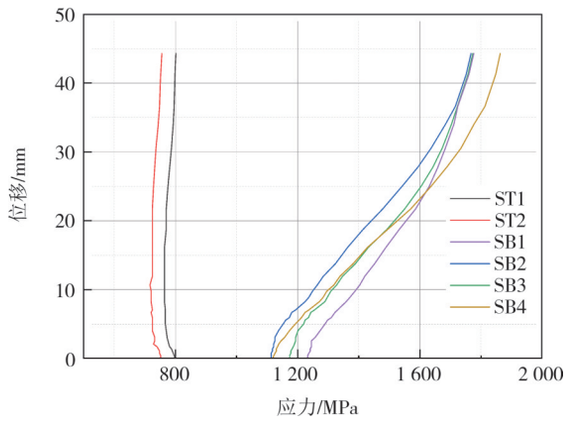
Fig.10　Displacement-maximum joint opening width

3.4　钢绞线应力响应

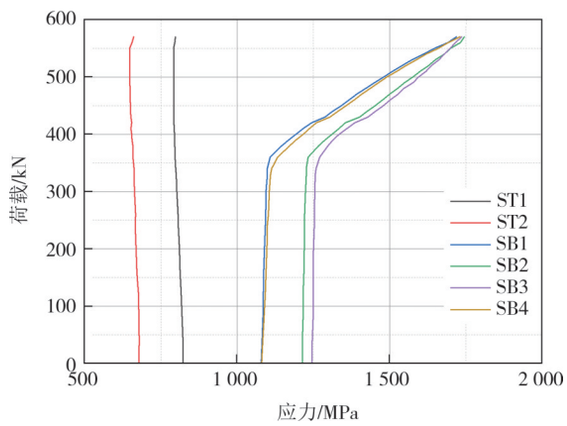
如图11所示,试验测量了各试件钢绞线的应力变化(见表6),各节段梁的钢绞线应力变化规律基本一致.其中,各节段梁试件的顶板束(ST1、ST2)的应力几乎不发生变化,体外预应力束(SB1~SB4)在开裂(接缝张开)前的应力增量较少.各节段梁钢绞线(SB1~SB4)的应力基本上呈两折线关系.此外,钢绞线应力与挠度基本呈线性关系(图11),不同转向角度的钢绞线(SB1、SB2),其应力增量几乎相等.



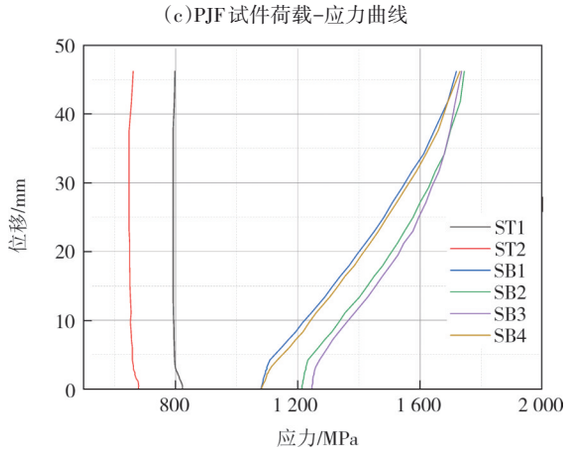
(a)DCJ试件荷载-应力曲线



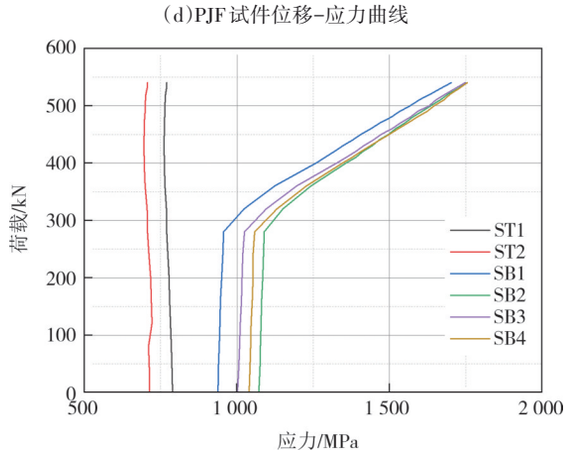
(b)DCJ 试件位移-应力曲线



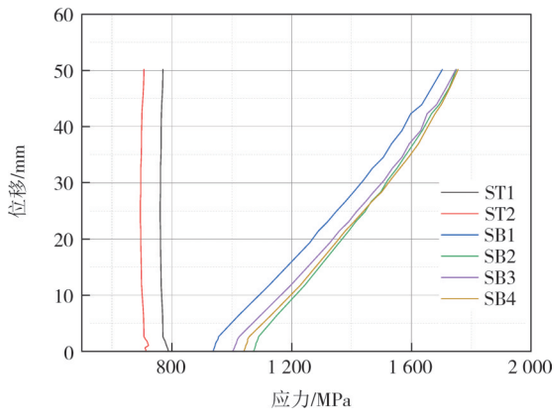
(c)PJF 试件荷载-应力曲线



(d)PJF 试件位移-应力曲线



(e)XCJ 试件荷载-应力曲线



(f)XCJ 试件位移-应力曲线

图 11 钢绞线应力响应

Fig.11 Responses of steel wire strands

表 6 各试件钢绞线应力增量

Tab.6 Increment of tendons stress in each specimen MPa

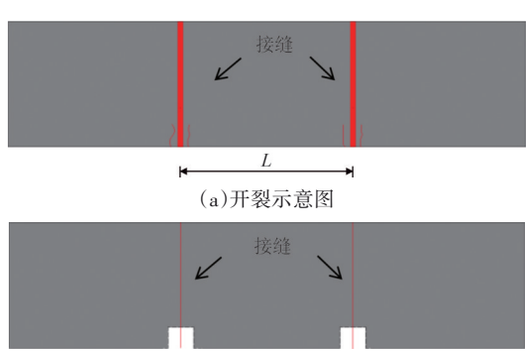
试件	钢绞线应力增量/MPa					
	ST1	ST2	SB1	SB2	SB3	SB4
PJF	−22.9	−16.4	639.1	533.2	500.1	650.2
DCJ	11.1	8.5	650.4	594.8	534.7	730.1
XCJ	−19	−8	760	670	748	711

4 预制拼装节段梁受弯刚度分析

4.1 刚度计算模型

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)[24]在计算预应力混凝土梁时,将其刚度分为开裂前和开裂后两种情况,UHPC 节段梁的受弯刚度计算也可分为接缝张开(开裂)前和接缝张开(开裂)后两个阶段(图 12).

阶段Ⅰ:$M<M_{cr}$.弯矩 M 小于接缝张开弯矩 M_{cr},试件处于弹性阶段,节段梁刚度 B 可按《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)[25]计算:



(a)开裂示意图

(b)刚度等效示意图

图 12 节段梁刚度计算示意图

Fig.12 Stiffness calculation schematic diagram for segmental beam

$$B = B_e = 0.85E_cI_0 \tag{1}$$

式中:B_e为截面未开裂时的刚度;E_c为混凝土弹性模量;I_0为截面惯性矩.

阶段Ⅱ:$M>M_{cr}$. 由于UHPC优异的抗裂性能,在纯弯区域内,仅观测到接缝张开及其附近的细小局部裂缝,《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)[25]规定,预应力混凝土节段梁开裂后刚度按普通混凝土整梁进行计算,然后按0.9的系数对计算得到的刚度进行折减. 事实上,对于普通混凝土的节段预制拼装梁,除了接缝处的分离现象以及其附近的裂缝外,节段内混凝土也存在裂缝[26],这与UHPC节段梁有所区别.

如图13所示,取长度为L的UHPC节段进行分析,设接缝张开后的刚度为B_{cr},其刚度在一侧的分布长度为αL,不计UHPC梁体开裂,节段$(1-2\alpha)L$长度内的刚度仍为B_e.

$$B_{cr}=E_cI_{cr} \tag{2}$$

式中:开裂截面换算截面惯性矩I_{cr}由受压区高度,按开裂换算截面对中性轴惯性矩之和求得[24]. 由于张开位置在接缝处,计算时忽略UHPC的抗拉贡献,计算时将体外筋面积的30%等效计入体内筋[26].

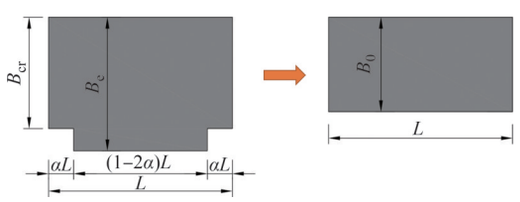


图13　节段梁刚度分布图

Fig.13　Stiffness distribution for segmental beam

为简便分析,对图中的单位梁长L=1的刚度按端部转角相等为原则进行等效,可以得到节段梁的刚度为:

$$B = B_e/\left[2\alpha\frac{B_e}{B_{cr}} + (1 - 2\alpha)\right] \tag{3}$$

引入《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)[27]裂缝平均宽度的计算公式,接缝刚度等效长度按式(4)进行计算:

$$2\alpha L = \psi\left(1.9c + 0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}}\right) \tag{4}$$

式中:c为受拉钢筋保护层厚度,对于节段梁取受拉区内钢绞线至受拉边缘的距离;d_{eq}为受拉钢筋等效直径;ρ_{te}为有黏结筋的配筋率. 对于UHPC节段梁,在接缝处并无黏结筋,因此忽略二者影响,式(4)简化为:

$$2\alpha L = 1.9\psi c \tag{5}$$

接缝等效刚度长度修正系数ψ可假定其形式与裂缝宽度所建议的不均匀系数相同:

$$\psi = a\left(1 - \frac{bM_c + cM_0}{M}\right) \tag{6}$$

文献[28]对裂缝宽度进行计算时,建议a=1.2,b=1.0,c=0.8,其值由试验数据拟合得到. 为明确物理意义,本文取b=c=1,此时,$M_0=\sigma_{pc}W_0$为受压端消压弯矩,$M_c+M_0=M_{cr}$,而$M_{cr}=\gamma f_t$为与UHPC节段接缝胶强度相关的弯矩,γ是与结构胶相关的系数,根据本文数据拟合得到,取0.25;在节段梁接缝处,由于钢筋不连续,接缝张开宽度一般比裂缝宽度大,a由本文的实验数据拟合得到,取1.5. 式(6)转化为:

$$\psi = 1.5\left(1 - \frac{M_{cr}}{M}\right) \tag{7}$$

对于四点加载的梁,跨中挠度f按式(8)计算:

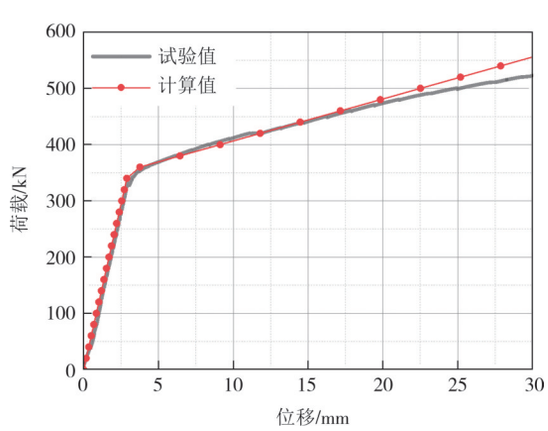
$$f = \frac{(3l^2 - 4d^2)M}{24B} \tag{8}$$

式中:l为剪跨区长度;d为纯弯段长度.

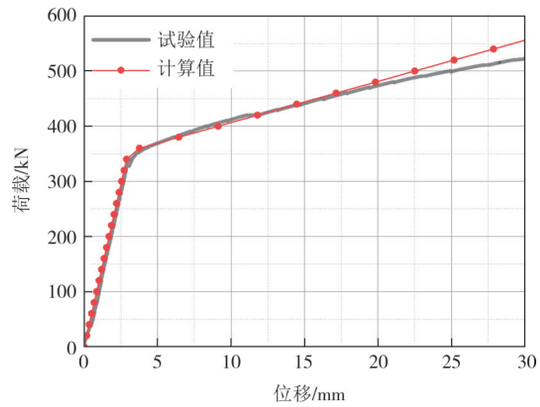
4.2　计算模型验证

结合式(1)~式(8)可以求得节段梁的荷载-跨中挠度曲线,图14给出了各节段梁试件在不同荷载下的挠度计算值,计算结果与试验值吻合良好. 尤其是当跨中挠度小于15 mm时,预测结果展现出了很高的精度. 对于DCJ试件,公式中并未计及齿键结构形式的影响,相比其他试件,XCJ试件的预测结果稍差. 此外,采用本文的计算方法对文献[18]中试验梁FS-1与FS-2进行刚度分析[图14(d)(e)],结果表明本文的计算方法仍表现出较高的精度.

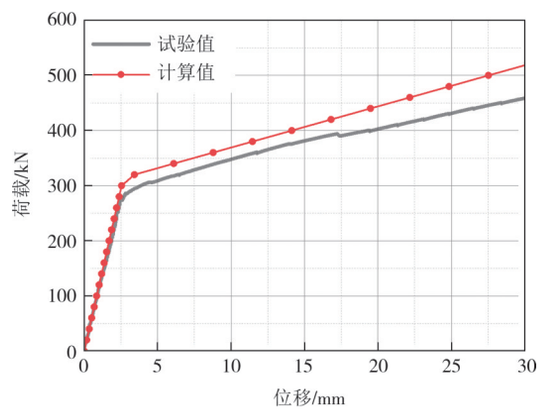
总体而言,本模型为计算UHPC节段梁的抗弯刚度提供一种计算思路,并可以较为准确地对节段梁的抗弯刚度进行预测,但与结构胶和等效刚度长度修正系数相关的参数尚需更多的试验结果来验证.



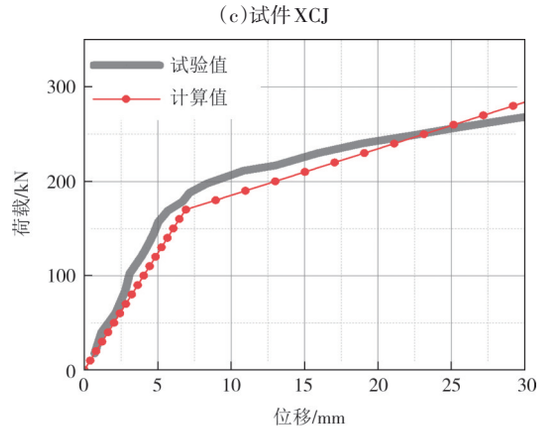
(a)试件PJF



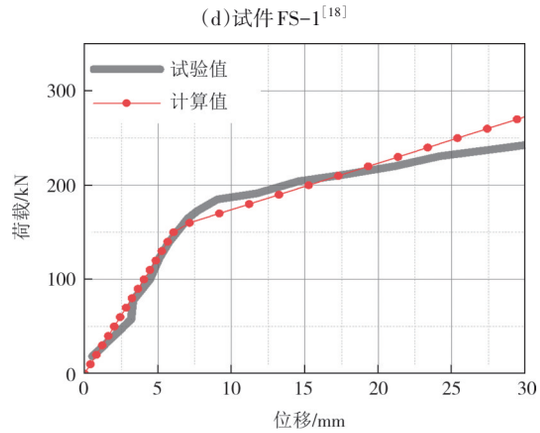
(b)试件DCJ



(c)试件XCJ



(d)试件FS-1[18]



(e)试件FS-2[18]

图14 节段梁刚度计算

Fig.14 Stiffness prediction for segmental beam

5 结 论

本文以一座实际的UHPC节段薄壁箱梁桥为原型桥,设计了3片3∶20的等效工字形节段梁进行了抗弯试验,提出了一种计算UHPC节段薄壁箱梁的刚度计算模型,主要结论如下:

1)对于薄壁UHPC箱梁桥,受弯时其主要薄弱位置位于接缝及其附近处.简化的工字梁试验表明,UHPC基体在试件破坏后并未发现其他正截面裂缝.此外,各节段梁试件的极限承载力几乎都在570 kN附近,不同的胶接缝形式,对其抗弯承载能力的影响较为有限.

2)试验过程中,各试件的顶板束应力变化较小.在未开裂之前,底板预应力束的应力变化不大.底板束的应力与试件位移呈线性关系,不同转向角度的底板束其应力变化近乎相同.

3)相比于设置小齿键的节段梁,配置大齿键的节段梁试件在同级荷载下,表现出较强的限制接缝张开的能力.同时,小齿键与平接缝试件的接缝张开速度相当.

4)基于试验现象,提出了一种计算预制装配节段UHPC箱梁刚度的模型,该模型可以较为准确地预测UHPC节段箱梁的刚度,但与结构胶和等效刚度长度修正系数相关的参数取值尚需更多的试验验证.

参考文献

[1] 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)

[2] SHAO X D, PAN R S, ZHAN H, et al. Experimental verification of the feasibility of a novel prestressed reactive powder concrete box-girder bridge structure[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017015.

[3] 张楠. 预防大跨PC梁桥开裂和下挠的措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
ZHANG N. The research of measure to prevent long-span PC girder bridge from crack and defection[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)

[4] ZHANG Y, ZHU P, ZHU Y P, et al. NC-UHPC composite structure for long-term creep-induced deflection control in continuous box-girder bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(6): 04018034.

[5] CHEN D, YANG Y X, LIU P. Analysis of deflection problems of large-span continuous rigid frame bridge and prevention measures [C]//MATEC Web of Conferences 22, 2015: 04021.

[6] WANG G L, XIE J, FU Y F. Investigation on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2009, 4(1): 71-76.

[7] CAO G H, SHEN J Y, YANG L G, et al. Experimental and modeling study on long-term deformation of three-span prestressed concrete continuous box-girder bridge model after cracking [J]. Journal of Bridge Engineering, 2024, 29 (10): 04024073.

[8] BAŽANT Z P, YU Q, LI G H. Excessive long-time deflections of prestressed box girders. II: numerical analysis and lessons learned[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(6): 687-696.

[9] YOUAKIM S A, GHALI A, HIDA S E, et al. Prediction of long-term prestress losses[J]. PCI Journal, 2007, 52(2): 116-130.

[10] 詹豪. 密集隔板超高性能混凝土薄壁箱梁力学性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
ZHAN H. Study on mechanical properties of the thin-walled box girder with dense diaphragm plates composed of ultra-high performance concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)

[11] 潘仁胜. 混凝土及UHPC箱梁腹板抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
PAN R S. Study on shear performance of webs of concrete and UHPC box girder[D]. Changsha: Hunan University, 2017. (in Chinese)

[12] 雷薇. 超大跨径UHPC连续箱梁桥抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学,2013.
LEI W. The study of shear performance of ultra-long span UHPC continuous girder bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)

[13] 鲁邦泽, 邵旭东, 邱明红, 等. 密集隔板UHPC箱梁体外预应力束转向构造研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 51-59.
LU B Z, SHAO X D, QIU M H, et al. Steering configuration of external prestressed tendon in UHPC box girder with dense diaphragms[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(1): 51-59. (in Chinese)

[14] 张策, 邵旭东, 张阳. 超大跨径UHPC连续箱梁桥接缝设计及模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(4): 52-58.
ZHANG C, SHAO X D, ZHANG Y. Joint design and model tests of extra-long-span continuous box girder bridge composed of UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(4): 52-58. (in Chinese)

[15] 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)

[16] YE M, LI L F, YOO D Y, et al. Mechanistic understanding of precast UHPC segmental beams with external tendons and epoxy joints subject to combined bending and shear[J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115698.

[17] 梁雪娇. 超高性能混凝土节段预制拼接梁抗弯性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
LIANG X J. Experimental study on flexural behavior of precast assembled beams of ultra-high performance concrete segments [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[18] 李立峰, 毛佳豪, 叶萌, 等. 体外预应力UHPC节段梁抗弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 67-76.
LI L F, MAO J H, YE M, et al. Experimental study on flexural behavior of precast segmental UHPC beams with external tendons [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(11): 67-76. (in Chinese)

[19] 钱佩柔. 节段预制拼装体外预应力UHPC简支箱梁抗弯性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学,2020.
QIAN P R. Flexural performance research on externally prestressed UHPC segmental simply-supported box girder [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)

[20] 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.
LI G P. Method for design of externally prestressed concrete bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[21] LI G P, YANG D H, LEI Y. Combined shear and bending behavior of joints in precast concrete segmental beams with external tendons [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 1042-1052.

[22] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

[23] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[24] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018. (in Chinese)

[25] 公路装配式混凝土桥梁设计规范: JTG/T 3365-05—2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
Specifications for design of highway precast concrete bridges: JTG/T 3365-05—2022[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022. (in Chinese)

[26] 宋守坛. 高速铁路预制拼装箱梁桥抗弯及接缝抗剪试验研究与理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2015.
SONG S T. Experimental study and theoretical analysis in bending and joint shear high-speed railway precast of segmental concrete box bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)

[27] 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38: 2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
Technical specification for fiber reinforced concrete structures: CECS 38: 2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese)

[28] 丁大钧. 钢筋混凝土构件抗裂度裂缝和刚度[M]. 南京: 南京工学院出版社,1986.
DING D J. Crack resistance, crack resistance and stiffness of reinforced concrete members [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1986. (in Chinese)