文章编号:1674-2974(2025)07-0050-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025066

RBP-UHPC变截面悬挑梁足尺受弯试验研究

何林忆[1],熊学玉[1,2†],包联进[3],陈建兴[3]
[1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学),上海 200092;
3. 华东建筑设计研究院有限公司,上海 200002]

摘 要:为了探究缓粘结预应力超高性能混凝土(RBP-UHPC)悬挑梁的受力性能,以上海大歌剧院悬挑楼梯为背景,进行了2根足尺RBP-UHPC变截面悬挑梁的受弯性能试验.试验结果表明,加载过程中,各关键截面依次开裂,关键截面附近裂缝最密集;离关键变截面越远,裂缝越短越稀疏;悬挑梁破坏截面在距离梁根部2.6 m;越接近破坏截面的UHPC和钢筋应变发展越快,越早达到UHPC的弹性压应变和钢筋的屈服应变;两根梁破坏截面的安全裕度分别为1.97和1.81,具有较好的结构性能,能够满足实际工程的强度要求.提出了带有结构板的π形变截面RBP-UHPC悬挑梁抗弯承载力的计算模型.相比于现有规范,本文模型的计算结果与已有试验的结果吻合最好,且偏于安全.

关键词:缓粘结预应力;超高性能混凝土;变截面;悬挑梁;受弯试验
中图分类号:TU378.2 **文献标志码**:A

Research on Full-scale Bending Test of RBP-UHPC Variable Section Cantilever Beam

HE Linyi[1], XIONG Xueyu[1,2†], BAO Lianjin[3], CHEN Jianxing[3]
[1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education (Tongji University), Shanghai 200092, China;
3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China]

Abstract: In order to investigate the mechanical behavior of RBP-UHPC (retard-bonded prestressed ultra-high performance concrete) cantilever beam, two full-scale RBP-UHPC variable section cantilever beams were tested based on the background of the cantilever stairs in Shanghai Opera House. The test results show that during the loading process, the key variable sections cracked in turn, and the cracks were most dense near the key sections. The farther away from the key variable sections, the shorter and sparser the cracks were. The failure position of the cantilever beam was 2.6 m away from the root of the beam. The closer the section was to the failure section, the

* **收稿日期**:2024-05-23
基金项目:上海市社会发展科技攻关项目(20dz1202003),Science and Technology Commission of Shanhai Municipality(20dz1202003);国家自然科学基金资助项目(52078364),National Natural Science Foundation of China(52078364);安徽省住房城乡建设科学技术计划资助项目(2020-YF21), Anhui Province of Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology Plan Project(2020-YF21)
作者简介:何林忆(1997—),女,湖南株洲人,同济大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:xiong_xueyu@tongji.edu.cn

sooner the strain of UHPC and rebar reached the elastic compressive strain of UHPC and the yield strain of the rebar. The safety margin of the failure section of the two beams was 1.97 and 1.81 respectively, which had good structural performance and can meet the strength requirements of practical engineering. A calculation model for the ultimate bending moment of RBP-UHPC π-shaped variable section cantilever beam with structural plate was proposed. Compared with the existing codes, the calculated results of the model in this paper were in the best agreement with the experimental results and were safer.

Key words: retard-bonded prestressed; ultra-high performance concrete (UHPC); variable section; cantilever beam; bending test

RBPT(缓粘结预应力筋)具有UPT(无粘结预应力筋)和BPT(有粘结预应力筋)共同的优势.RBPT由内部的预应力钢绞线、外层护套及填充并紧密封裹于二者之间的缓黏结剂构成[1].在施工阶段缓粘结剂未凝固,RBPT完全按照UPT进行施工,其力学特点也与UPT相近.在使用阶段缓粘结剂完全固化,RBPT又表现出BPT的特性,能够达到与BPT相同的受力性能[2].RBPT既具有UPT施工方便、布筋灵活的优点,又具备BPT材料强度利用率高的特点,适用于建筑和桥梁等结构.

UHPC(超高性能混凝土)不含粗集料,掺入了活性矿物掺合料并添加了钢纤维,具有超高的抗压强度、弹性模量和耐久性[3],能够有效减小结构尺寸,并能保证结构的安全性,近年来得到广泛的应用.

Graybeal[4]对1片全尺寸UHPC有黏结预应力Ⅰ字型梁进行了四点弯曲试验,试验结果表明,普通混凝土的抗弯设计方法中不能忽略受拉区混凝土的贡献.Yang等[5]对4根大型UHPC有粘结预应力T形梁进行了受弯试验,提出了一种将钢纤维效应纳入UHPC预应力梁抗弯分析的方法,考虑了拉伸软化,能预测预应力UHPC梁的抗弯强度.Li等[6]对1片大比例UHPC-T形有黏结预应力梁进行了受弯性能试验,试验结果表明,现有规范均低估了UHPC抗拉性能对抗弯承载力的贡献.Fang等[7]对1片UHPC有黏结预应力I字型梁进行了抗弯性能试验,试验结果表明,忽略纤维的贡献会低估UHPC预应力梁的抗弯能力,特别是在配筋率较低的情况下.在桥梁结构中,UHPC也被应用到了悬臂盖梁中.吴薇[8]以及叶萌等[9]对预制预应力UHPC悬臂盖梁的优化设计表明,UHPC可以提高悬臂盖梁的挖空率,满足盖梁的轻型化、强度高、耐久性好的工程需求.Ye等[10]还对2片缩尺预应力UHPC悬臂盖梁进行了抗弯性能试验,试验结果表明主裂缝出现在两柱之间的纯弯段,并发生了弯曲破坏.

目前BPT与UHPC相结合的应用较多,而RBPT与UHPC相结合的相关研究相对缺乏.建筑结构中,UHPC梁的约束也以简支为主,“悬臂”的约束形式较少.而桥梁结构中,存在UHPC悬臂盖梁的抗弯性能研究,但以纯弯段为主要研究对象,没有对悬臂梁段进行相关的研究.目前梁的截面形式也以矩形、I形、T形为主,对于带结构板的π形变截面还没有相关的试验和研究.

本文以上海大歌剧院悬挑楼梯[11]为背景(图1),对两根足尺RBP-UHPC变截面悬挑梁进行了受弯性能试验,对试件的破坏现象、裂缝分布、弯矩挠度曲线进行了研究,提出了适用于RBP-UHPC梁抗弯承载力的计算模型.本研究可为现有规范的完善提供参考,也能够为RBPT与UHPC结合的构件以及变截面悬挑梁这种新型的构造形式在实际工程中的应用提供设计依据和理论基础.

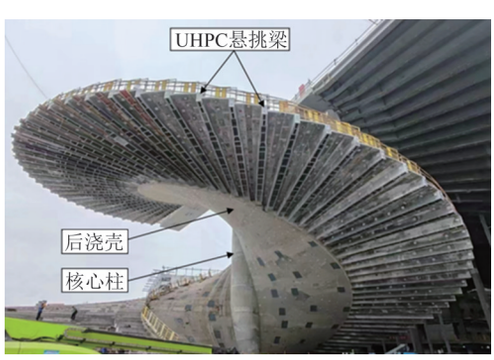


图1　上海大歌剧院悬挑楼梯

Fig.1　Cantilever staircase in Shanghai Grand Opera House

1 试验概况

1.1 试件设计和安装

本试验对一组两根构造相同的悬挑梁进行了受弯性能试验,编号分别为梁L1和梁L2.图2为悬挑梁构造图,其中锚固区是由C80混凝土后浇的,悬挑梁是由UHPC预制的.悬挑梁带有不对称结构板,结构板厚度为100 mm,下结构板底部距离梁底部130 mm,上结构板顶部距梁顶部85 mm.悬挑梁具有多个变截面,关键的变截面标号为:截面1~11.变截面之间是线性变化的.梁的根部截面为矩形,从截面3开始中间挖空,变为"π"形的截面形式.

悬挑梁纵筋为HRB400C20,箍筋为HRB400C10@150.RBPT直径为21.6 mm,共26根,根据不同长度分为A、B、C三类.其中A类对称布置了两束,每束6根RBPT;B类对称布置了两束,每束4根RBPT;C类布置了一束,每束6根RBPT.各截面各束RBPT距梁顶部距离均在图2(c)中标出.A、B、C三种RBPT的固定端分别在截面6.1、7.1、10.以C束RBPT在截面10的固定端照片为例,如图3(a)所示,固定端RBPT采用挤压式锚具,在锚具下方穿入垫板和螺旋箍筋;锚具、垫板和螺旋箍筋全部预埋在梁的内部,张拉端分别在锚固区的齿块A、B、C处.以A束RBPT在齿块A的张拉端照片为例,如图3(b)所示,张拉端采用单孔三夹片式低回缩锚具,锚垫板、螺旋筋配套使用.采用YDC500Q-200 22系列锚具专用千斤顶对RBPT进行张拉.

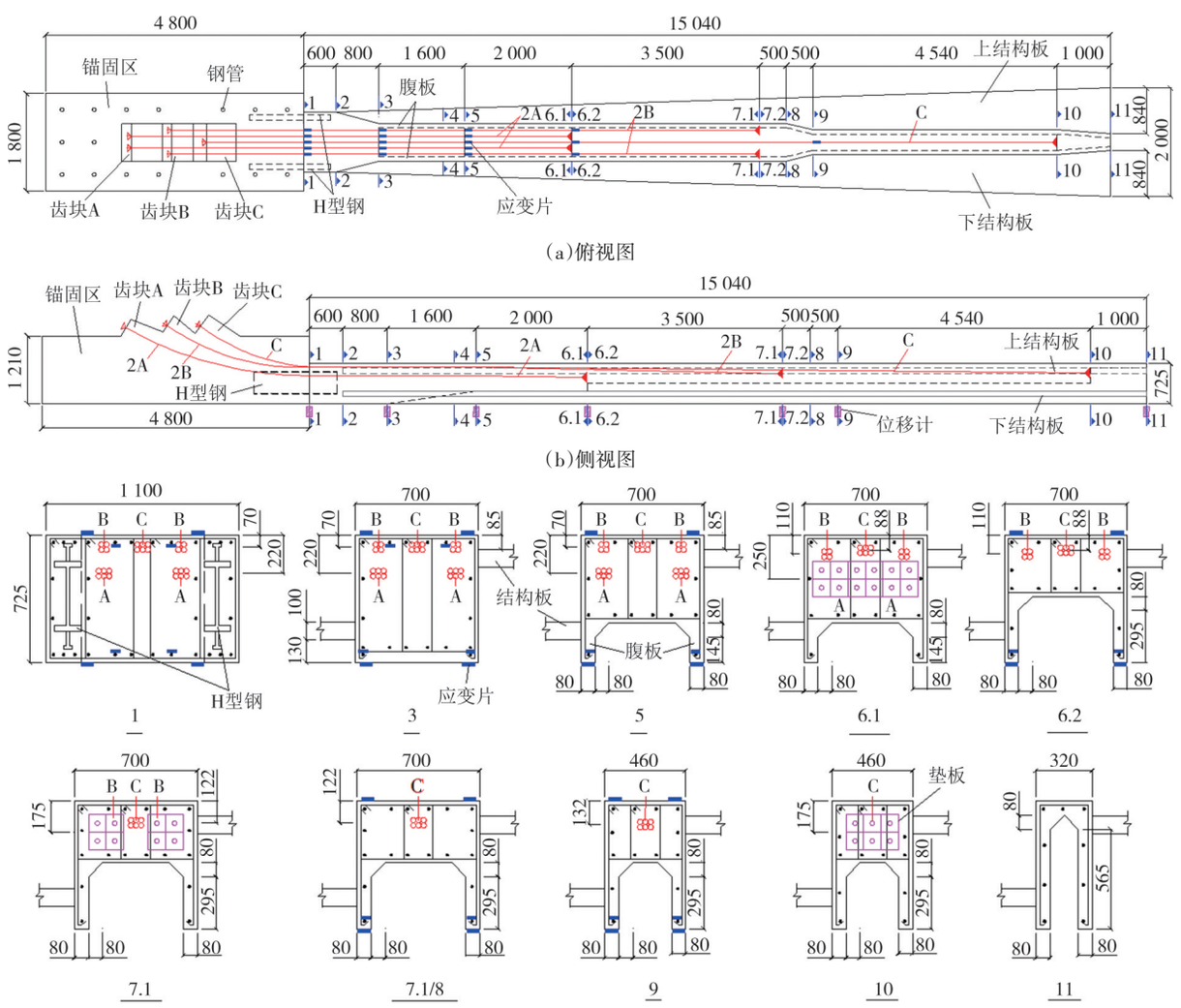
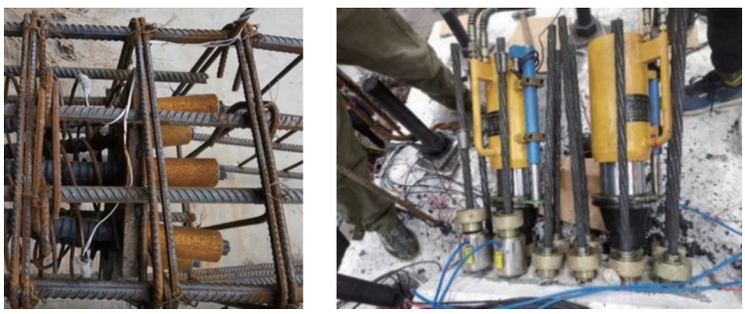


图2 试件构造图(单位:mm)

Fig.2 Specimen structure diagram (unit: mm)



(a)固定端(截面10)　　(b)张拉端(齿块A)

图3　张拉端和固定端

Fig.3　Tension end and fixed end

图4为悬挑梁的实物照片和安装图.预制悬挑梁放置在钢托架上,锚固区放置在2.5 m高的钢支座上,并通过16根锚杆固定,侧面与钢托架连接.钢托架下还设有临时支撑的脚手架.当悬挑梁的RBPT张拉完成之后,割掉钢托架与锚固区相连的钢管,拆除脚手架,卸下钢托架,从而实现整根梁的“悬挑”.

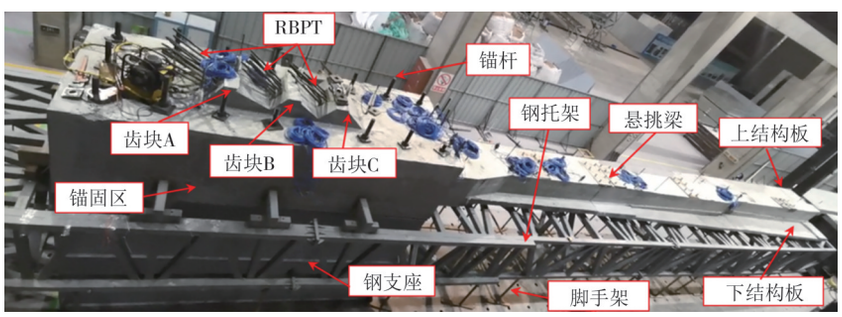


图4　试件安装图

Fig.4　Installation of the specimen

1.2　材料特性

梁L1和梁L2的UHPC为不同批次.参照规范《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[12]和《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018)[13]测定了UHPC材性,结果如表1所示,UHPC的受压和受拉应力应变曲线分别如图5和图6所示.梁L1和梁L2的普通钢筋和RBPT为相同批次,纵筋的屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为445 MPa、631 MPa和2.26×10^5 MPa,RBPT的条件屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为1 732 MPa、1 838 MPa和2.11×10^5 MPa.

表1　UHPC材料性能

Tab.1　Material properties of UHPC

试件	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	f_t/MPa	E_c/(10^4MPa)	ε_{cu}/με
梁L1	164.38	144.47	9.39	5.97	3 280
梁L2	173.15	148.42	10.08	6.12	3 002

注:f_{cu}为立方体抗压强度;f_c为棱柱体轴心抗压强度;f_t为轴心抗拉强度;E_c为弹性模量;ε_{cu}为梁破坏界面受压边缘的极限压应变.

1.3　测点布置

在各关键变截面处的RBPT上粘贴了应变片,如图2(a)所示,在各变截面布置了位移计,如图2(b)所示,在各变截面顶边缘和底边缘沿纵向粘贴了混凝土应变片,如图2(c)所示,在各变截面顶排钢筋和底排钢筋粘贴了钢筋应变片,如图2(c)所示.

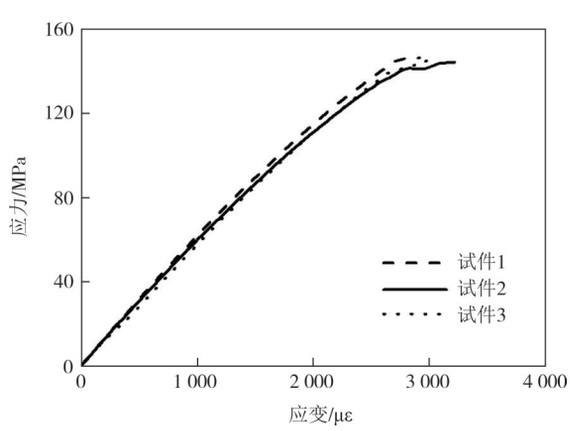


图5　UHPC轴心受压应力-应变曲线

Fig.5　Axial compressive stress-strain curve of UHPC

1.4　加载方案

为了等效实际工程中的梯形均布荷载,采用两个作动器(F_1和F_2)和两个分配梁(D1和D2)进行4点集中力加载.加载点和分配梁位置如图7所示,试

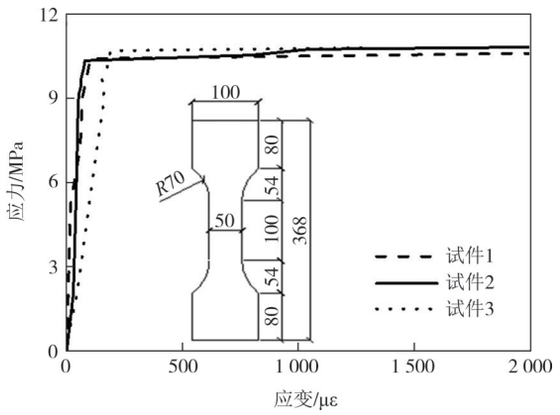


图 6 UHPC轴心受拉应力-应变曲线

Fig.6 Axial tensile stress-strain curve of UHPC

验装置如图8所示.为了避免扭矩和横向变形的影响,试验还设置了约束梁扭转和横向变形的约束装置,在约束梁C1、C2和分配梁D2的横向梁上开孔,并插入锚杆来约束悬挑梁的横向位移和扭转,因此可以忽略扭转对其受力性能的影响,破坏截面可以不考虑扭矩的作用.试验前对试件进行预压,试验设备及构件自重作为加载的一部分.在荷载达到承载力检验荷载值(F_1=104 kN,F_2=329 kN)前采用力加载,之后改为位移加载至破坏.

2 试验结果

2.1 破坏模式和裂缝分布

图9为梁L1和梁L2的破坏模式和裂缝分布.可见,梁L1和梁L2的裂缝分布大致相同,主要分布在截面1和9之间.由于上结构板对裂缝发展有一定的阻碍作用,下结构板一侧最长裂缝发展长度能达到500 mm,而上结构板一侧最长裂缝仅有300 mm,可见悬挑梁两侧裂缝发展具有不对称的特性.在截面1和5之间的梁段的裂缝分布较均匀,而在5~6.1、6.2~7.1梁段内,距离关键截面越远,裂缝数目越少,间距越大,裂缝长度越短.例如,在截面5附近的裂缝间距约为100 mm,长度约为350 mm,当靠近6.2时,裂缝间距增大到约130 mm,长度也减小到约180 mm.在距离根部2.6 m处,截面4的裂缝发展速度最快,并成为主裂缝,破坏时裂缝宽度达到了0.2 mm.主裂缝向下延伸发展迅速,裂缝宽度增加明显,最后在截面4附近,梁受压区UHPC被压坏.

2.2 弯矩-挠度曲线

为了统一两个力共同作用下的弯矩效应,本文直接给出了破坏截面4的弯矩M_4以及梁端部的挠度δ_{11}.梁L1和梁L2的M_4-δ_{11}曲线如图10所示.

根据工程实际荷载,承载力设计荷载值是由1.43倍恒荷载以及1.65倍活荷载构成的.恒荷载主要为面层荷载,大小为2.49 kN/m^2;活荷载大小为3.5 kN/m^2.承载力设计荷载值对应的破坏截面弯矩M_4为2 676.19 kN·m.由图10可见,梁L1和梁L2破坏截面的抗弯承载力分别为4 191.92 kN·m和3 779.31 kN·m,加上自重和工装在破坏截面的弯矩1 071 kN·m,安全裕度分别为1.97和1.81,可见此悬挑梁完全可以保证实际工程中的安全性,且具有较大的安全裕度.

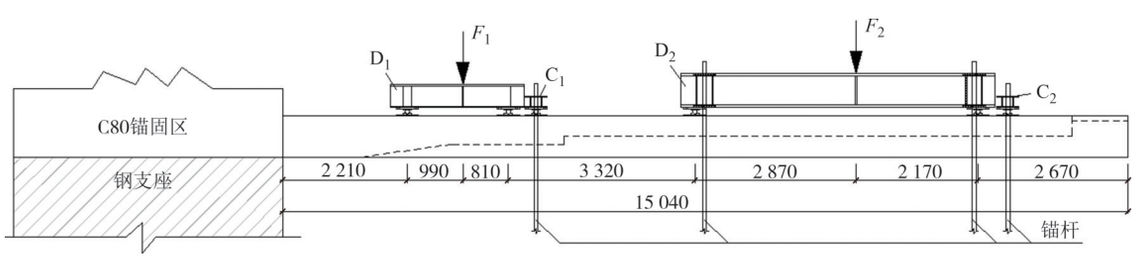


图7 悬挑梁加载示意图(单位:mm)

Fig.7 Loading diagram of cantilever beam(unit:mm)

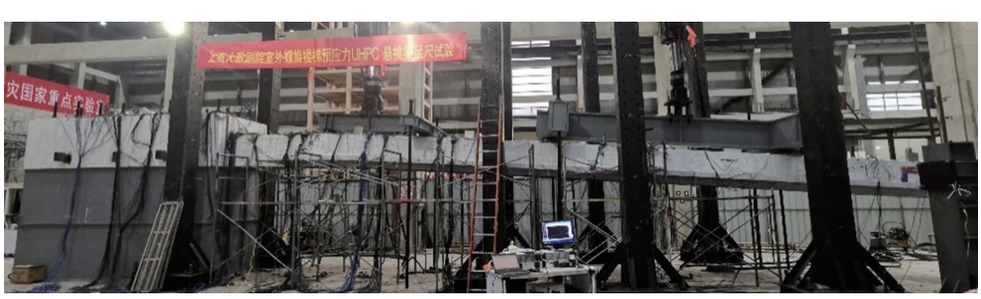
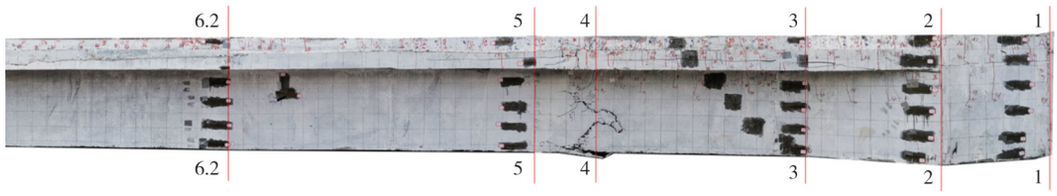
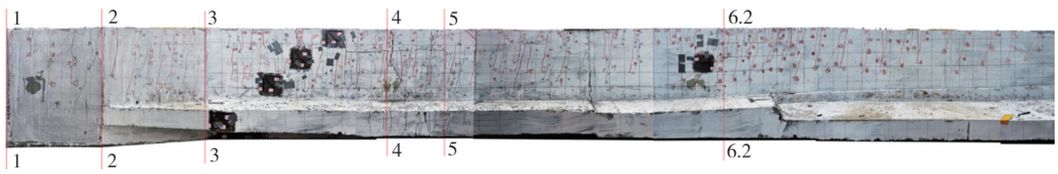


图8 试验加载装置

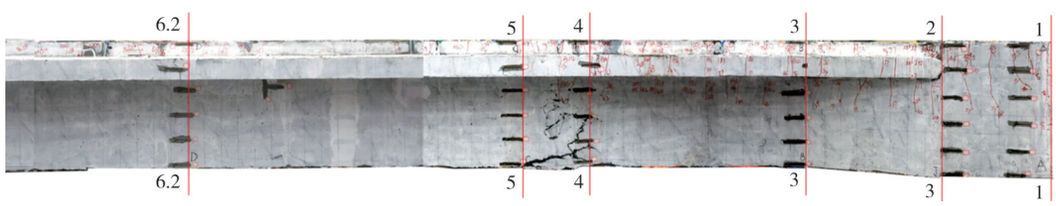
Fig.8 Test loading device



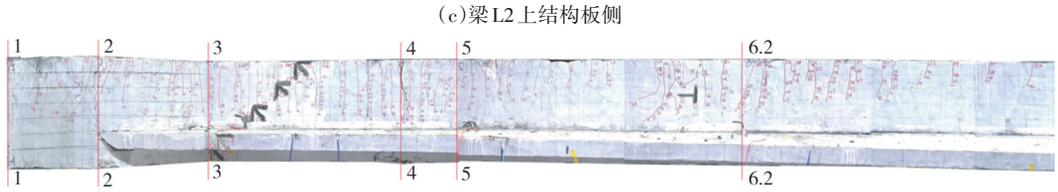
(a)梁L1上结构板侧



(b)梁L1下结构板侧



(c)梁L2上结构板侧



(d)梁L2下结构板侧

图9　悬挑梁破坏模式和裂缝分布

Fig.9　Failure mode and crack distribution of cantilever beam

由图10可见,对于上升段,梁L1和梁L2的弯矩-挠度曲线较接近,梁L1破坏截面的抗弯承载力比梁L2大7.8%,端部挠度比梁L2大12.3%.开裂之前,悬挑梁处于弹性阶段,弯矩与端部挠度呈线性关系;开裂之后,悬挑梁进入弥散开裂阶段,弯矩与挠度表现出明显的非线性关系.截面4处的普通钢筋最先屈服,悬挑梁进入屈服阶段,随后截面4附近越来越多钢筋屈服,直至截面4受压区UHPC被压坏.

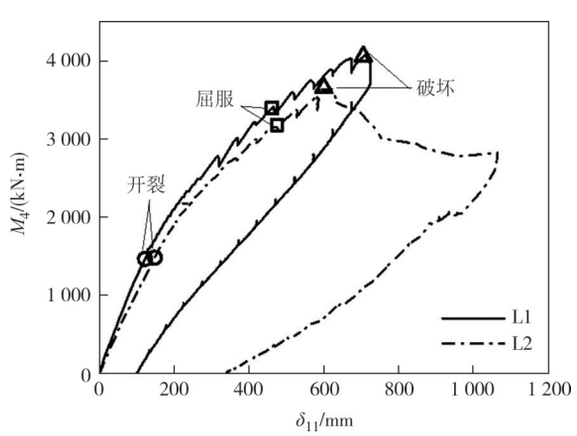


图10　M_4-δ_{11}曲线

Fig.10　M_4-δ_{11} curves

梁L1是第一根试验梁,破坏时由于端部挠度过大,为了安全而停止加载.梁L2在达到破坏后选择继续加载,此时悬挑梁进入破坏阶段,截面弯矩降低,挠度迅速增加,最后由于悬挑梁变形过大而停止加载.破坏后UHPC悬挑梁不仅具有超大变形,还仍能持续承受一定荷载,具有较好的承载能力和延性.当卸载至0时,梁L1和梁L2分别恢复了最大变形的87.8%和68.1%,可见预应力并未完全失效.

2.3　UHPC应变

梁L1和梁L2各变截面UHPC应变发展接近,以梁L1为例,悬挑梁各关键变截面顶部和底部边缘UHPC应变的试验结果如图11所示.图例中第一个字母"U"表示受拉边缘,"D"表示受压边缘,第二个数字表示截面.

试件开裂前,各变截面的UHPC应变随着弯矩的增加而线性增大;当截面开裂后,受拉区边缘UHPC应变发展曲线出现转折点,应变曲线呈非线性发展.通过转折点可以看出,截面5最先开裂,距离破坏位置最近.悬挑梁各个关键截面开裂的顺序依次是5、3、1、6.2、7.2,截面9未开裂.UHPC的弹性压

应变ε_{c0}在图11中标出.不同截面UHPC应变增长速度不同,其中截面5的UHPC压应变增长速度最快.最终只有截面5的UHPC压应变超过弹性压应变ε_{c0},且破坏时截面5的压应变达到了3 280 με,因此破坏截面4距离截面5最近.

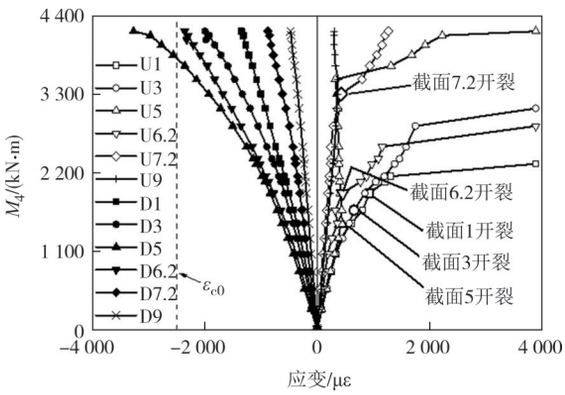


图11 梁L1各截面顶部和底部边缘UHPC应变

Fig.11 UHPC strain on top and bottom edges of each section of beam L1

2.4 钢筋应变

梁L1和梁L2各关键变截面钢筋应变发展相似,以梁L1为例,悬挑梁各截面顶排和底排钢筋应变的试验结果如图12所示.图例中标号的第一个字母"S"表示钢筋,第二个数字表示截面,第三个字母"U"表示最顶排受拉钢筋,"D"表示最底排受压钢筋.

试件开裂前,各截面的钢筋应变随着弯矩的增加而线性增加;当截面开裂后,呈明显非线性发展.钢筋屈服后,钢筋应变随着弯矩的增大迅速增加,钢筋受拉和受压屈服的界限均在图12中标出,可见,因为截面5和截面3离破坏截面4最近,因此截面5和截面3的受拉和受压钢筋的应变发展速度最快,最早达到屈服应变.

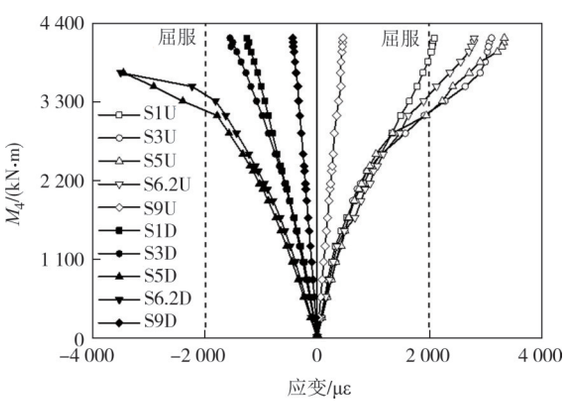


图12 梁L1各截面顶排和底排钢筋应变

Fig.12 Strain of the top and bottom rebars of each section of beam L1

3 抗弯承载力计算

3.1 抗弯承载力计算模型

本文根据UHPC的材性试验结果,将UHPC应力应变曲线简化为线弹性拉压本构,如图13所示,其中E_c为UHPC弹性模量,ε_{t0}为UHPC达到抗拉强度f_t时的弹性受拉应变,ε_{tu}为UHPC极限拉应变,ε_{c0}为UHPC达到抗压强度f_c时的弹性压应变,ε_{cu}为试验梁受压区边缘UHPC的极限压应变.抗弯承载力计算模型如图14所示.

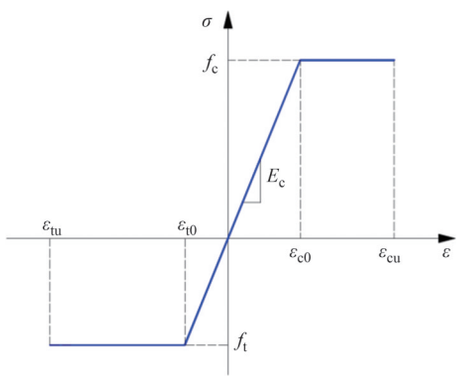


图13 UHPC本构

Fig.13 UHPC constitutive

破坏截面的抗弯承载力需要根据图14(c)对UHPC沿截面高度分布的应力进行积分计算得到.为了简化计算,如图14(d)所示,参考普通混凝土梁的计算理论,将UHPC受压区等效为矩形压应力分布,根据力的大小和作用位置相互等效的原则,等效之后的压应力大小为αf_c,受压区高度为βx_0,其中x_0为等效前的受压区高度.考虑受拉区UHPC对抗弯承载力的贡献,将受拉区UHPC的复杂拉应力等效为矩形分布,其应力大小为kf_t.参考普通混凝土梁的等效原理并根据平截面假定,得到破坏截面受压区压应力大小系数、受压区高度等效系数和受拉区拉应力大小等效系数分别为:α=0.88,β=0.69,k=0.24.

对于RBPT的应力取值,当RBPT处于无粘结状态时,按式(1)进行计算,即RBPT的有效预应力与预应力增量之和;当RBPT处于有粘结状态时,按式(2)计算,RBPT应力直接取屈服强度.由于本试验RBPT是在张拉之后立刻加载的,RBPT处于无粘结状态,破坏时RBPT未达到屈服强度,因此按式(1)计算.第i束RBPT在破坏截面的有效预应力取试验结果,如

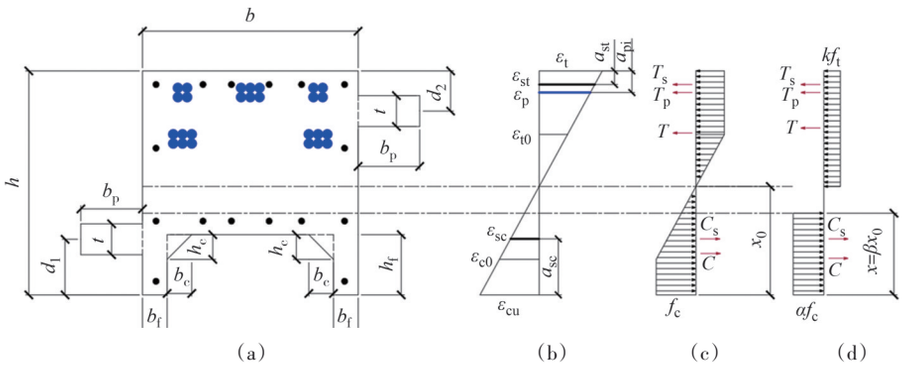


图 14　抗弯承载力计算模型

Fig.14　Calculation model of ultimate bending moment

表 2 所示.悬挑梁破坏时各束 RBPT 的预应力增量采用试验结果,如表 3 所示.悬挑梁各变截面的抗弯承载力按式(3)~式(8)计算.

$$\sigma_{pui}=\sigma_{pei}+\Delta\sigma_{pi}\leqslant f_{py} \tag{1}$$

$$\sigma_{pui}=f_{py} \tag{2}$$

式中:σ_{pui}为第 i(i 为 A、B、C)束 RBPT 的极限应力;$\Delta\sigma_{pi}$为第 i 束 RBPT 的预应力增量;σ_{pei}为第 i 束 RBPT 在破坏截面的有效预应力;f_{py}为 RBPT 的屈服强度.

表 2　各束 RBPT 在截面 4 的有效预应力

Tab.2　The effective prestress of each bundle RBPT in section 4

试件	有效预应力/MPa		
	A 束	B 束	C 束
梁 L1	1 132.0	1 171.7	1 149.0
梁 L2	1 023.0	1 148.5	1 123.7

表 3　各束 RBPT 预应力增量的试验结果

Tab.3　Test results of prestressing increment of each bundle RBPT

试件	有效预应力/MPa		
	A 束	B 束	C 束
梁 L1	143.33	221.05	209.12
梁 L2	100.18	178.60	160.70

当 $x\geqslant h_f$ 时,受压区高度 x 按式(3)计算,截面抗弯承载力按式(4)计算.

$$A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}+kf_tb(h-x/\beta)+A_{sc}f_{ys}=\alpha f_c[2b_fh_f+b_ch_c+b(x-h_f)]+A_{st}f_{ys} \tag{3}$$

$$M_u=\alpha f_c[2b_fh_f(x-h_f/2)+b_ch_c(x-h_f+h_c/3)+b_pt(x-d_1)+b(x-h_f)^2/2]+kf_tb(h-x/\beta)(h/2-x+x/2\beta)+kf_tb_pt(h-d_2-x)+A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}(h-x-a_{pi})+A_{sc}f_{ys}(h-x-a_{sc})+A_{st}f_{ys}(x-a_{st}) \tag{4}$$

当 $h_f-h_c\leqslant x<h_f$ 时,受压区高度 x 按式(5)计算,截面抗弯承载力按式(6)计算.

$$A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}+kf_tb(h-x/\beta)+A_{sc}f_{ys}=\alpha f_c[2b_fx+(x-h_f+h_c)^2]+A_{st}f_{ys} \tag{5}$$

$$M_u=\alpha f_c[b_fx^2+(x-h_f+h_c)^3/3+b_pt(x-d_1)]+kf_tb_pt(h-d_2-x)+kf_tb(h-x/\beta)\times(h/2-x+x/2\beta)+A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}(h-x-a_{pi})+A_{sc}f_{ys}(h-x-a_{sc})+A_{st}f_{ys}(x-a_{st}) \tag{6}$$

当 $0\leqslant x<h_f-h_c$ 时,受压区高度 x 按式(7)计算,截面抗弯承载力按式(8)计算.

$$A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}+kf_tb(h-x/\beta)+A_{sc}f_{ys}=2\alpha f_cb_fx+A_{st}f_{ys} \tag{7}$$

$$M_u=\alpha f_c[b_fx^2+b_pt(x-d_1)]+kf_tb_pt(h-d_2-x)+kf_tb(h-x/\beta)(h/2-x+x/2\beta)+A_{st}f_{ys}(x-a_{st})+A_{p1}\sum\sigma_{pui}n_{pi}(h-x-a_{pi})+A_{sc}f_{ys}(h-x-a_{sc}) \tag{8}$$

式中:A_{sc}、A_{st}分别为受压区和受拉区普通钢筋面积;A_{p1}为单根 RBPT 截面面积;n_{pi}为第 i 束缓粘结预应力筋中钢绞线根数;f_{ys}为普通钢筋的屈服强度;f_{py}为 RBPT 的屈服强度;h 为梁截面高度;b 为梁截面宽度;b_c为倒角宽度;h_c为倒角高度;h_f为腹板高度;b_f为腹板宽度;b_p为结构板宽度;t 为结构板厚度;d_1为下结构板重心距截面腹板受压区边缘的距离;d_2为上结构板重心距截面受拉区边缘的距离;a_{sc}为受压区普通钢筋合力作用点至截面腹板受压区边缘的距离;a_{st}为受拉区普通钢筋合力作用点至截面受拉区边缘的距离;a_{pi}为第 i 束 RBPT 重心至截面受拉区边缘的距离.对于矩形截面有 $b_f=b_p=t=0$.

3.2　计算模型验证

梁 L1 和梁 L2 破坏截面的抗弯承载力计算结果如表 4 所示.由表 3 和表 4 可见,由于梁 L2 的 RBPT 预应力增量比梁 L1 小,最终梁 L2 的抗弯承载力也比梁

L1小.梁L1和梁L2抗弯承载力的计算值与试验值误差均仅为2%,可见计算结果与试验结果吻合较好.

表4 破坏截面(截面4)抗弯承载力试验和计算结果

Tab.4 Test and calculation results of ultimate bending moment of the failure section (section 4)

试件	M_{tu}/(kN·m)	M_{su}/(kN·m)	M_G/(kN·m)	M_{su0}/(kN·m)	M_{tu}/M_{su0}
梁L1	4 191.92	5 196.87	1 071.04	4 118.64	1.02
梁L2	3 779.31	4 929.80	1 071.04	3 867.51	0.98

注:M_{tu}为抗弯承载力试验值;M_{su}为抗弯承载力计算值;M_G为试件和工装自重在破坏截面的弯矩值;M_{su0}为扣除自重和工装后的抗弯承载力计算值.

3.3 计算方法对比

瑞士规范(UHPFRC)[14]、美国规范(FHWA-HIF-13-032)[15]、澳大利亚规范(Design guidelines for RPC prestressed concrete beams)[16]、法国规范(Ultra high performance fibre reinforced concretes)[17]和我国规范《建筑工程超高性能混凝土应用技术规程》(T/CECS 1216—2022)(后简称T/CECS)[18]都给出了UHPC的拉压本构模型.在受弯承载力的计算过程中美国、澳大利亚、法国规范均按照拉压本构模型进行计算,T/CECS规范将受压区和受拉区应力均等效为矩形应力分布后计算受弯承载力.瑞士规范将受拉区应力等效成矩形应力分布,受压区应力仍按照本构计算,但只考虑弹性阶段,即受压区为三角形应力分布.

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[19],普通混凝土立方体与圆柱体强度的换算关系为f_{cu}=1.25f_{cy},棱柱体与圆柱体强度的换算关系为f_c=0.95f_{cy},其中f_{cu}为立方体抗压强度,f_c为棱柱体抗压强度,f_{cy}为圆柱体抗压强度.根据规范(ASTM C1856/C1856M—17)[20],UHPC材料的换算系数因致密性高和应力分布均匀而减小,立方体与圆柱体强度的换算系数通常在1.10~1.20之间,棱柱体与圆柱体的换算系数更接近1.因此,对于国外规范中的圆柱体抗压强度f_{cy},本文按照f_c=f_{cy}的关系进行换算.

为了验证本文所提抗弯承载力计算方法的适用性,选取了文献[21-39]中共106个试件,考虑了矩形、T形、π形的截面形式,有、无预应力筋,以及BPT、UPT和RBPT三种预应力筋类型.将本文方法、瑞士规范[14]、美国规范[15]、澳大利亚规范[16]、法国规范[17]和T/CECS规范[18]的计算结果与已有文献试验结果进行比较,结果如图15所示.各规范计算与试验结果比值的平均值以及变异系数如表5所示.可见,根据瑞士和T/CECS规范得到的计算结果偏大,不够安全;而美国、澳大利亚、法国规范得到的计算结果过于保守;本文方法得到的试验结果与计算结果的比值为1.07,变异系数为0.11,要优于各个规范的计算方法,且计算结果偏于安全.

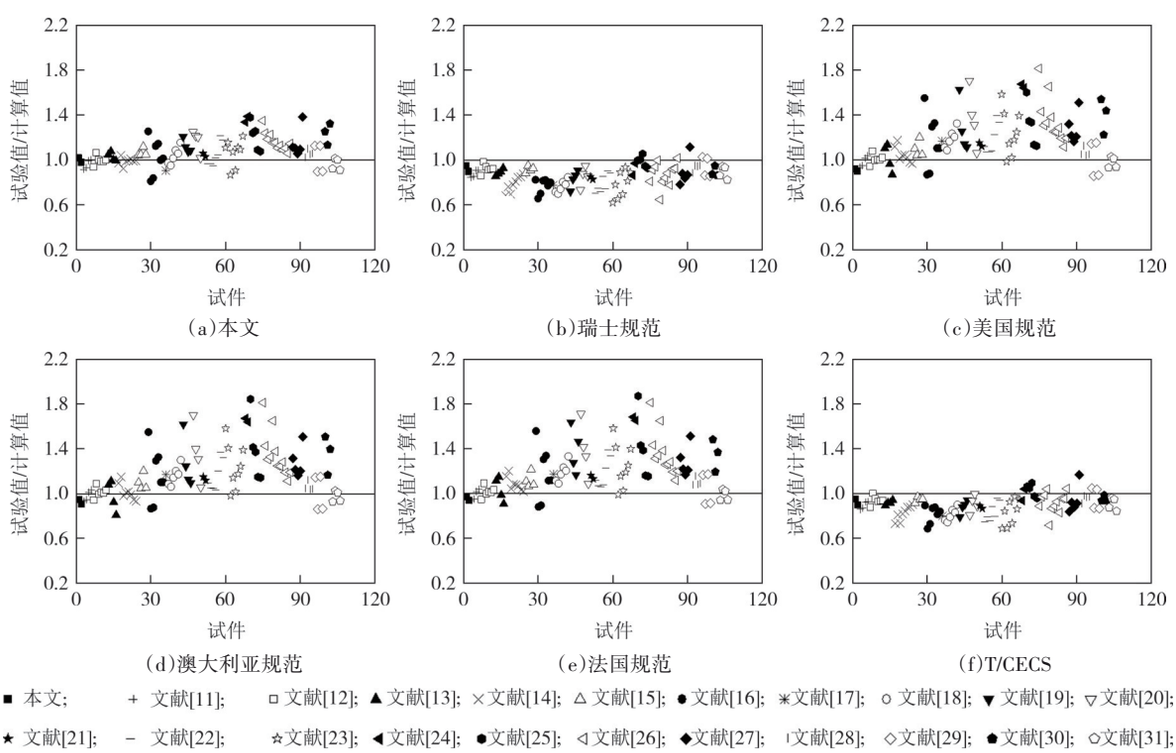


图15 各方法试验与计算结果比值

Fig.15 The ratio of experimental and calculation results of each method

表5　各方法试验与计算比值的平均值和变异系数

Tab.5　The average value and coefficient of variation of the ratio of experimental and calculation results of each method

方法	平均值	变异系数
本文	1.07	0.11
瑞士规范	0.86	0.11
美国规范	1.18	0.18
澳大利亚规范	1.18	0.18
法国规范	1.20	0.17
T/CECS	0.91	0.11

4　结 论

本试验对足尺RBP-UHPC变截面悬挑梁进行了受弯性能试验,得到了如下结论:

1)提出的悬挑梁采用了较新的材料和构造形式.悬挑梁L1和梁L2破坏截面的安全裕度分别为1.97和1.81,具有较好的结构性能,能够满足实际工程的强度要求.

2)加载过程中,各关键变截面依次开裂,悬挑梁左右两侧裂缝发展具有不对称性,相同截面的梁段内,离关键变截面越远,裂缝越短越稀疏.因此,关键变截面是裂缝集中的区域,应加强这些部位的配筋来提高延性和抗裂性.

3)悬挑梁破坏截面不在根部而是在距离根部2.6 m处,结构设计时,应关注薄弱截面,且应加强此处的局部配筋来提升安全储备.试验中RBPT处于无粘结状态,破坏时未屈服.而实际工程使用中RBPT处于有粘结状态,承载力将更高,结构性能更能满足工程要求.

4)各变截面的UHPC和钢筋应变发展各不相同,越接近破坏截面的UHPC和钢筋应变发展越快,越早达到UHPC的弹性压应变和钢筋的屈服应变.因此结构设计中对于不同梁段可用梯度配筋或局部加强策略,提高材料利用效率.

5)当RBPT处于无粘结状态时,RBPT应力为有效预应力与预应力增量之和;当RBPT处于有粘结状态时,RBPT应力应取屈服强度.

6)本文提出了抗弯承载力计算模型,且该模型适用于带有结构板的π形截面、矩形和T形截面.相较于现有规范,本文模型的计算结果与现有试验结果吻合最好,且偏于安全.计算模型在材料非线性行为、截面特性影响及力学分析方法上进行了优化,扩大了适用范围,并提高了计算的精确性和设计可靠性,尤其在复杂截面形状的抗弯性能评估中具有显著优势.

参考文献

[1] XIONG X Y, HE L Y, ZHOU Z W, et al. The bond-slip constitutive model of retard-bonded prestressing steel strand [J]. Construction and Building Materials, 2023, 365:129995.

[2] 熊学玉, 华楠, 余鹏程. 缓粘结部分预应力混凝土梁静载试验研究[J]. 建筑结构,2018, 48(8): 34-40.
XIONG X Y, HUA N, YU P C. Static load test study on partially prestressed retard-bonded concrete beams [J]. Building Structure, 2018,48(8):34-40. (in Chinese)

[3] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement & Concretce Research, 1995, 25(7): 1501-1511.

[4] GRAYBEAL B A. Flexural behavior of an ultra-high-performance concrete I-girder [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(6):602-610.

[5] YANG I H, JOH C, KIM B S. Flexural strength of large-scale ultra high performance concrete prestressed T-beams [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38(11): 1185-1195.

[6] LI H H, LI L F, FAN X, et al. Experimental and numerical investigation on the flexural behavior of a large-scale prestressed UHPC T-Shaped girder[J]. Engineering Structures, 2022, 272: 115027.

[7] FANG Z,TIAN X,PENG F. Flexural strength of prestressed ultra-high-performance concrete beams [J]. Engineering Structures, 2023,279:115612.

[8] 吴薇. UHPC150大悬臂盖梁设计和受力特性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 23-27.
WU W. The design of UHPC150 large cantilever bent up and the analysis of the stress characteristics [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 23-27. (in Chinese)

[9] 叶萌, 姚志立. 全预制轻型UHPC盖梁设计方案及模型试验[J]. 公路工程, 2021, 46(4): 84-90.
YE M, YAO Z L. Experimental study on shear behavior of prestressed UHPC-T beam [J]. Highway Engineering, 2021, 46(4): 84-90. (in Chinese)

[10] YE M, LI L F, HU F J, et al. UHPC-based precast large-cantilevered thin-walled bent caps: design and experiments [J]. Engineering Structures, 2022, 272: 114909.

[11] 陈建兴, 包联进, 刘康, 等. 上海大歌剧院结构选型与设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(9): 42-47.
CHEN J X, BAO L J, LIU K, et al. Structural selection and design of Shanghai Grand Opera[J]. Building Structure, 2022, 52(9): 42-47. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018 [S]. 北京: 中国建筑材料联合会, 2018.

Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Association, 2018. (in Chinese)

[14] MCS-EPFL. Ultra-high performance fibre reinforced cement based composites (UHPFRC): construction material, dimensioning and application [S]. Zurich: Switzerland Swiss Federal Institute of Technology, 2016.

[15] Design guide for precast UHPC waffle deck panel system, including connections: FHWA-HIF-13-032 [S]. Washington, US: Department of Transportation, 2013.

[16] Design guidelines for RPC prestressed concrete beams [S]. Sydney: The University of New South Wales, 2000.

[17] AFGC, SETRA. Ultra high performance fibre reinforced concretes [S]. Paris: AFGC and SETRA Working Group, 2013.

[18] 建筑工程超高性能混凝土应用技术规程:T/CECS 1216—2022 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022.
Technical specification for application of ultra high performance concrete in building engineering: T/CECS 1216—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese)

[19] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design ofconcrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

[20] Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete: ASTM C1856/C1856M—17 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

[21] 孟刚,贾金青,王吉忠. 预应力超高强混凝土简支梁抗弯性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(5):575-580.
MENG G, JIA J Q, WANG J Z. Study on flexural behavior of prestressed ultra-high strength concrete beams [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34 (5): 575-580. (in Chinese)

[22] 徐海宾,邓宗才. 预应力超高性能钢纤维混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(12):58-64.
XU H B, DENG Z C. Experimental research on flexural behavior of prestressed ultra-high performance steel fiber concrete beams [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12): 58-64. (in Chinese)

[23] 郑文忠,李莉,卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):125-134.
ZHENG W Z, LI L, LU S S. Experimental research on mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 125-134. (in Chinese)

[24] 曹霞,彭金成,金凌志. 预应力活性粉末混凝土简支梁受力性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(1):116-122.
CAO X, PENG J C, JIN L Z. Experimental research on mechanical performance of prestressed RPC beam [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(1): 116-122. (in Chinese)

[25] FENG Z, LI C X, YOO D Y, et al. Flexural and cracking behaviors of reinforced UHPC beams with various reinforcement ratios and fiber contents [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113266.

[26] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 246-262.

[27] BAE B I, CHOI H K, CHOI C S. Flexural strength evaluation of reinforced concrete members with ultra high performance concrete [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016(1): 2815247.

[28] KAHANJI C, ALI F, NADJAI A. Structural performance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams [J]. Structural Concrete, 2017, 18(2): 249-258.

[29] CHEN S M, ZHANG R, JIA L J, et al. Flexural behaviour of rebar-reinforced ultra-high-performance concrete beams [J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(19): 997-1015.

[30] HASGUL U, TURKER K, BIROL T, et al. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios [J]. Structural Concrete, 2018, 19(6): 1577-1590.

[31] SINGH M, SHEIKH A H, MOHAMED ALI M S, et al. Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2017, 138: 12-25.

[32] QI J N, WANG J Q, MA Z J. Flexural response of high-strength steel-ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams based on a mesoscale constitutive model: experiment and theory [J]. Structural Concrete, 2018, 19(3): 719-734.

[33] QIU M, SHAO X, WILLE K, et al. Experimental investigation on flexural behavior of reinforced ultra high performance concrete low-profile T-beams [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2020, 14(1): 1-20.

[34] 刘超,黄钰豪,马汝杰,等. 高应变强化超高性能混凝土T形梁抗弯承载力[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):744-750.
LIU C, HUANG Y H, MA R J, et al. Calculation method for flexural capacity of high strain-hardening UHPC T-beams [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(6): 744-750. (in Chinese)

[35] TURKER K, HASGUL U, BIROL T, et al. Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams [J]. Composite Structures, 2019, 229: 111400.

[36] RANDL N, CSABA S, TAMÁS M. Experimental investigations on UHP (FR) C beams with high strength reinforcement [C]// RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. France: RILEM, 2013.

[37] 梁兴文,汪萍,徐明雪,等. 配筋超高性能混凝土梁受弯性能及承载力研究[J]. 工程力学,2019,36(5):110-119.
LIANG X W, WANG P, XU M X, et al. Investigation on flexurel capacity of reninforced ultra high performance concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(5): 110-119. (in Chinese)

[38] 苏家战,傅元方,黄卿维,等. 钢筋超高性能混凝土梁受弯试验和有限元分析研究[J]. 中外公路,2017,37(6):99-105.
SU J Z, FU Y F, HUANG Q W, et al. Bending test and finite element analysis of reinforced ultra-high performance concrete beams [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(6): 99-105. (in Chinese)

[39] 杨剑,方志. 预应力超高性能混凝土梁的受弯性能研究[J]. 中国公路学报,2009,22(1):39-46.
YANG J, FANG Z. Research on flexural behaviors of prestressed ultra high performance concrete beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(1): 39-46. (in Chinese)