DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.02.33

UHPC 材料连接的预制梁受弯性能试验研究

冯军骁[1], 郑七振[1], 龙莉波[2], 陈 刚[1]
(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海建工二建集团, 上海 200080)

摘 要: 为研究 UHPC 预制装配梁的受弯性能,设计了 8 根梁进行静力加载试验,包括 6 根不同搭接长度的 UHPC 装配梁、1 根普通混凝土装配梁及 1 根现浇混凝土对比梁,以分析不同搭接长度对 UHPC 装配梁受弯性能的影响。研究表明:UHPC 装配梁的破坏形态与现浇混凝土对比梁相似,裂缝均匀分布于普通混凝土预制段且随着搭接长度增加,裂缝间距减小;UHPC 装配梁承载力实测值与计算值比值大于 1.36,并且远大于普通混凝土装配梁;增加钢筋搭接长度对提高 UHPC 装配梁的开裂荷载影响不大,当搭接长度为 10 *d* 时,UHPC 装配梁的受弯性能基本与现浇混凝土对比梁相当。

关键词: UHPC 预制装配梁 ; 受弯性能; 破坏形态; 承载力; 变形性能
中图分类号:TV314 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2017)02-0189-08

Experimental studies of bending performance of ultra high performance concrete prefabrication – assembly beam

FENG Junxiao[1], **ZHENG Qizhen**[1], **LONG Libo**[2], **CHEN Gang**[1]
(1. *School of Environment and Architecture*, *University of Shanghai for Science & Technology*, *Shanghai* 200093, *China*;
2. *Shanghai Construction No.* 2(*Group*) *Co.*, *Ltd. Shanghai* 200080, *China*)

Abstract: In order to investigate the bending performance of UHPC prefabrication and assembly beams, 8 beams were designed and the static load experiments carried out , including 6 UHPC prefabrication – assembly beams which had different lapped lengths, an ordinary concrete prefabrication assembly beam and a cast – in – situ concrete beam to analyze the impact of different lapped lengths to the UHPC prefabrication – assembly beams. The results showed that the failure mode of the prefabrication – assembly beam were similar to the contrast beam, the cracks were distributed evenly over ordinary concrete precast segments. With the increase of lapped length, fracture spacing decreased; the ratio of the measured and calculated values of the bearing capacity of UHPC prefabrication – assembly beam were greater than 1.36, far more than that of ordinary prefabrication – assembly beam ;increasing the lapped lengths of steel had little influence to improve the cracking load of UHPC assembly beams, when the lapped length for 10d, the bending performance of UHPC prefabrication – assembly beams were basic similar to the cast – in – situ concrete beam.

Key words: UHPC(ultra – high performance concrete) prefabrication and assembly beam; flexural behavior; failure mode; bearing capacity; deformation properties

1 研究背景

预制装配式混凝土是建筑工业化的一种重要结构型式。20 世纪 90 年代开始,我国引进装配式大板居住建筑技术,并建立规范体系[1]。随着可持续发展和节能环保要求的不断提升、劳动力成本持续增加,以装配式混凝土结构体系为代表的建筑工业化得到了越来越多的重视,其应用逐渐升温。

预制装配式混凝土结构依靠节点及拼缝将预制构件连接成为整体。连接节点的选型和设计应注重概念设计,并通过合理的连接节点与构造,保证构件的连续性和结构的整体稳固性,使整个结构具有必

收稿日期:2016-08-30; **修回日期**:2016-11-29
基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(14DZ120835)
作者简介:冯军骁(1991-),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为结构工程。

要的承载能力、刚性和延性,以及良好的抗风、抗震和抗偶然荷载的能力,避免结构体系因偶然因素出现连续倒塌[1]。

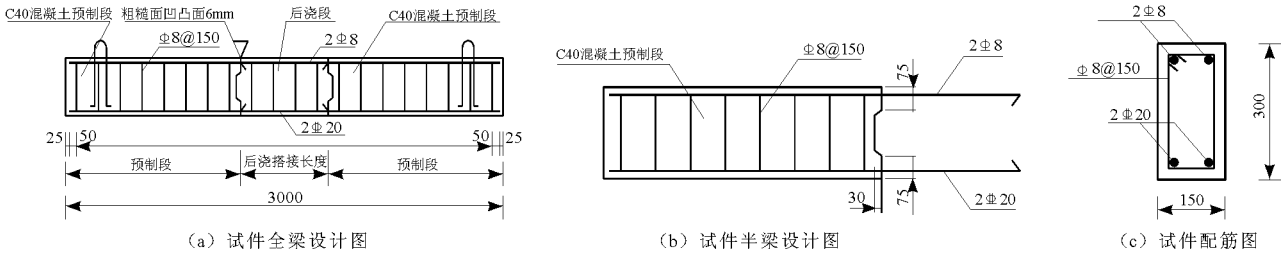
超高性能混凝土(简称 UHPC)因其优异的力学性能及耐久性,在近年来受到越来越多的关注[2-3],国内外一些学者也展开了对 UHPC 高性能混凝土应用于混凝土简支梁方面的研究。杨剑等[5]对 UHPC 的单轴受压应力-应变全曲线和 UHPC 梁的受弯性能进行了试验研究以及理论分析。研究结果表明:UHPC 具有良好的受压变形性能,良好的延性和极限变形能力。张大长等[6]制作了 4 根外壳预制核心现浇装配整体式矩形、T 形截面 RC 梁及对比梁,进行了 RC 梁的抗弯承载力试验研究,分析比较两类 RC 梁的荷载-挠度特性、开裂荷载和极限承载力,研究表明新型装配整体式 RC 梁与整浇 RC 梁具有相同的抗弯承载力特性,即具有很好的整体性和延性。李坚等[7]对预制节段梁在施工阶段与正常使用阶段梁整体及接缝的受力特性进行了试验研究。试验选取干接缝节段式的简支箱梁、预应力钢筋体内外混合布置的模型梁,计算对比试验数据结果,提出预应力预制节段连续梁在正常使用阶段可按整体梁设计。刘昌永等[8]为解决钢柱或组合柱与钢筋混凝土梁连接节点构造复杂、施工难度大等问题提出了两种端部带工字钢接头的预制装配式钢筋混凝土梁,并分别对两种新型梁及 1 个普通钢筋混凝土对比梁试件进行了受弯性能足尺试验。结果表明在 3 分点集中荷载作用下,3 个试件的变形性能和破坏形态基本一致;两种新型梁的开裂弯矩和极限弯矩与规范计算结果吻合良好,说明可按现行混凝土结构设计规范进行梁体的受弯承载力设计;钢接头和混凝土梁体之间几乎没有滑移,且钢端头在整个加载过程中处于弹性受力状态。徐海滨等[9]进行了 8 根超高性能混凝土 T 形简支梁的受弯性能试验,观察试验梁的开裂弯矩和裂缝发展,发现超高性能混凝土梁的弯曲裂缝细而密,加载初期最大裂缝宽度发展较慢,纵筋屈服后最大裂缝宽度发展明显加快。孙文彬等[10]通过制作 3 根装配预制梁及 1 根对比梁进行混凝土梁的抗弯承载力试验研究,分析不同现浇企口连接的装配预制梁力学性能。结果表明装配预制梁与整浇对比梁的破坏过程和破坏形态相似,开裂荷载与极限荷载相差不大,装配预制梁无论是跨中还是企口处的裂缝均开展合理,与对比梁相近,符合受弯构件裂缝展开理论,具有良好的变形性能。

本文以间接搭接连接方式为基础,通过应用超高性能混凝土 UHPC 代替套筒灌浆连接,得到 UHPC 装配式混凝土梁,并对其钢筋搭接长度进行梯度式系统研究。装配梁主要特点是梁两端预制,跨中部分后浇筑 UHPC 高性能混凝土,并设置位于纯弯段内的不同长度的后浇段。通过对装配梁进行静力加载试验,研究搭接长度对梁破坏形态、承载能力、变形性能等受弯性能的影响。

2 试验概况

2.1 试件设计与制作

试验共设计了 8 根试件梁,包括 6 根不同搭接长度的 UHPC 装配梁、1 根普通混凝土装配梁以及 1 根普通混凝土整浇梁。L2-0 为 C40 混凝土整浇梁,L2-1、L2-2、L2-3、L2-4、L2-5、L2-6 为 UHPC 装配梁,试件两端由 C40 普通混凝土预制,跨中钢筋搭接段后浇 UHPC 超高性能混凝土,搭接长度分别为 10 d(d 为底部受拉纵筋直径)、15 d、20 d、25 d、30 d、35 d,L2-7 为普通混凝土装配梁,试件由 C40 混凝土预制,跨中钢筋搭接段后浇 C50 混凝土,搭接长度为 35d。UHPC 装配梁及普通混凝土装配梁在后浇界面设置 6mm 的粗糙面,以促进新旧混凝土的黏结。试件的设计图及截面配筋图如图 1,试验梁设计参数如表 1,钢筋的力学性能如表 2,混凝土立方体抗压强度如图 1。



(a) 试件全梁设计图 (b) 试件半梁设计图 (c) 试件配筋图

图 1 试件梁设计及配筋图(单位:mm)

表 1　试件主要设计参数

试件编号	试件类型	梁截面 $b \times h$ /mm × mm	梁长/mm	纵向配筋	保护层厚度/mm	箍筋	架立钢筋	搭接长度/mm
L2 – 1	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	10 d = 200
L2 – 2	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	15 d = 300
L2 – 3	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	20 d = 400
L2 – 4	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	25 d = 500
L2 – 5	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	30 d = 600
L2 – 6	C40 预制、UHPC 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	35 d = 700
L2 – 7	C40 预制、C50 后浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	35 d = 700
L2 – 0	C40 现浇	150 × 300	3000	2φ20	25	φ8@150	2φ8	整浇梁

表 2　钢筋的力学性能

钢筋类型	屈服强度/(N · mm^{-2})	极限强度/(N · mm^{-2})	弹性模量/10^5(N · mm^{-2})
Φ	431.61	712.68	2.16
Φ	448.44	644.81	2.02

表 3　混凝土实测强度

混凝土类型	C40	C50	UHPC
抗压强度/MPa	41.97	51.73	129.71

2.2　加载方案及测点布置

2.2.1　*钢筋应变片布置*　在每根受拉纵筋搭接段布设应变片 S1 – S3(S4 – S6),分别位于搭接段中点及两侧等间距处,以观察搭接钢筋是否存在滑移现象,应变片具体粘贴位置如图 2。

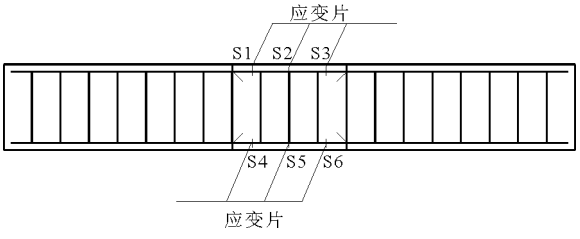


图 2　搭接段钢筋应变片布置

2.2.2　*混凝土应变片布置*　每根试件梁加载前一天,在梁跨中位置沿梁高截面等间距布设 5 片混凝土应变片,以测量试件梁受力过程中的应变变化规律及是否满足平截面假定,具体粘贴位置如图 3。

2.2.3　*加载装置*　为消除剪切段的影响,试验采用 3 分点静力加载,中间形成 1 000 mm 长纯弯段,反力架下固定 30 t 的液压千斤顶,通过分配梁将荷载对称的施加于试件梁,试验加载装置如图 4 所示。为防止局部受压破坏,在固定支座及滚动支座上下均放有钢板。试验梁上部依次为反力架、压力传感器、液压千斤顶、分配梁,跨中放置位移计以测量跨中挠度,两端支座处同样对称放置位移计,以测量支座位移从而消除支座沉降误差。

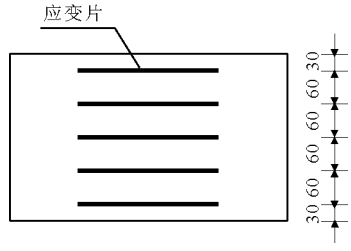


图 3　混凝土应变片布置

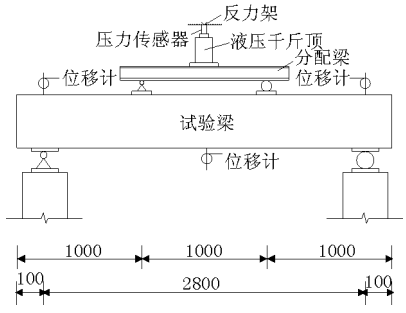


图 4　试验加载装置

2.2.4　*加载方案*　为了检查各个仪器是否正常工作,正式试验前先对试验梁进行预加载 ,预加载分三级,每级取计算开裂荷载的 20%,然后卸载进行调整。每级加载停歇 10 min,预载值不超过计算开裂荷载的 70%。

正式加载时每级加载值取标准荷载 Qs (约 10 kN)的 20%,分五级加到标准荷载;在达到标准荷载之后,每级荷载取标准荷载 Qs 的 10%;加载到计算开裂荷载 F_{cr} 的 90% 后,改为以标准荷载的 5% 加载;当荷载加到计算破坏荷载 F_d 的 90% 后,为得到精确的破坏荷载值,每级加载取计算破坏荷载 F_d 的 5%。

3 试验现象及破坏过程

试件 L2 -0 为现浇混凝土对比梁,在加载初期随荷载增大,混凝土及钢筋应变均呈线性增长,试件梁保持良好的受力形态,处于弹性工作状态;荷载达到 35 kN 时,试件开裂,梁底部加载点位置处首先出现弯曲裂缝,随着荷载进一步增大,试件梁两加载点之间裂缝不断增加,原有裂缝不断延伸,此阶段裂缝宽度增长缓慢,当荷载增加至 100 kN 时,受拉区纯弯段内弯曲裂缝数目基本不再增加,最大裂缝宽度可达 0.24 mm,弯剪区开始出现斜向裂缝;当荷载增加至 150 kN 时,梁底部受拉钢筋达到屈服,纯弯段内裂缝高度和宽度迅速发展,形成 4 ~6 条宽度明显较大的主裂缝,上部受压区出现水平裂缝及多条细小裂缝,梁跨中挠度激增,到达 166 kN 极限荷载后,裂缝处有明显吱吱声,荷载不再增加而挠度继续增长,试件破坏,表现为典型的适筋梁破坏。破坏时最大裂缝宽度达 1.79 mm,破坏挠度为 20.01 mm。

以L2 -3为例说明 UHPC 装配梁的破坏过程,35 kN 时试件开裂,加载点处梁底部及后浇界面处首先出现竖向裂缝,裂缝宽 0.02 ~0.04 mm,随着荷载进一步增大,两加载点之间预制段部分裂缝数量不断增加,原有裂缝不断延伸,裂缝宽度有所增加但比较缓慢,至 100 kN 时裂缝数量基本不再增加,最大裂缝宽度可达 0.38 mm;加载至 120 kN 时试件进入屈服阶段,预制段主裂缝及后浇界面裂缝宽度迅速发展,加载点外侧弯剪区出现细长斜裂缝,至 139 kN 时达到峰值荷载,受压区出现 1 ~2 条水平裂缝,跨中挠度迅速增加,试件破坏。破坏时预制段及后浇界面裂缝宽度分别为 2.26 和 3.69 mm,破坏挠度为 19.52 mm。

试件 L2 -7 为普通混凝土装配梁,加载过程中,15 kN 时试件开裂,加载点处梁底部出现弯曲裂缝,后浇界面出现明显裂缝,25 kN 时裂缝显著变宽,达到 0.6 mm,28 kN 时底部纵筋基本屈服,弯曲裂缝继续增加,加载至 28 kN 时裂缝数量基本不再增加,在预制段内共有 8 条竖向裂缝,最大宽度达 1.1 mm,后浇界面达 3.2 mm,33 kN 时荷载不再增加,达到峰值荷载,破坏时预制段主裂缝及后浇界面裂缝宽度极大,可达 3.9 mm,底部钢筋露出,破坏挠度达 29.7 mm。

对比试件梁破坏过程可知,普通混凝土整浇梁裂缝首先出现在两加载点及跨中处梁底部,之后随着荷载增大,两加载点之间裂缝不断增加,且分布较为均匀,裂缝间距较大,弯剪区斜裂缝出现较多,破坏时形成多条主裂缝;UHPC 装配梁裂缝首先出现在新旧混凝土结合面和加载点处梁底部,之后随荷载增大,后浇界面裂缝宽度不断增大,两支座之间预制段内裂缝不断增加,但后浇的 UHPC 段由于抗拉强度较高,裂缝极少,破坏时预制段主裂缝数量与普通混凝土整浇梁相当,但裂缝间距较小,且主裂缝为后浇界面处,破坏时主裂缝宽度较大;普通混凝土装配梁裂缝主要位于纯弯段内,但裂缝数量较少且间距明显大于整浇梁和 UHPC 装配梁,预制段主裂缝及后浇界面裂缝宽度普遍较大。

4 试验结果及分析

4.1 平截面假定适用性分析

通过在混凝土表面粘贴一定标距的混凝土应变片测得混凝土在试验过程中的应变变化情况,以 L2 -3 为例,如图 5 所示,试验梁跨中混凝土在各级荷载下的应变沿梁高分布能够较好符合平截面假定。达到开裂荷载后,随着荷载的进一步增加,中和轴不断上升,混凝土的应变值略有波动,但仍基本符合平截面假定,当裂缝较大后部分应变片失效。

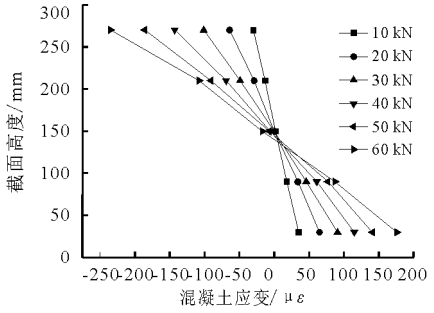


图 5 混凝土应变沿梁高分布

4.2 荷载 -跨中挠度分析

试验过程中在跨中及两端支座处放置位移计,在消除支座沉降等误差后,得到如图 6 所示加载过程中各试验梁的荷载 -挠度曲线。

由曲线可以看出,UHPC 装配梁荷载 -挠度曲线与现浇混凝土对比梁相似,基本可分为 3 个阶段,第 1 阶段为试件开裂前的弹性阶段,荷载 -挠度曲线呈线性增长,UHPC 装配梁的初始刚度与混凝土对比梁基本一致;试件开裂后进入第 2 个阶段,即试件开裂至钢筋屈服前的带裂缝工作阶段,曲线斜率下降,出现第 2 个拐点,可以看出随着搭接段长度的增加,UHPC 装配梁的屈服强度有所增加;第 3 阶段随着荷载继续增加,曲线逐渐趋于水平,跨中挠度急剧增大,直至试件破坏。随着搭接长度增加,UHPC

装配梁承载力有所提高，试件 L2－6 承载力已接近整浇梁，但破坏挠度小于现浇混凝土对比梁，原因在于 UHPC 装配梁存在事实上的施工缝，在承受荷载后，裂缝首先集中产生于预制段与后浇 UHPC 界面处，使得 UHPC 装配梁跨中后浇段整体下挠，跨中最大挠度处变的更为平缓，所以破坏挠度小于普通混凝土整浇梁。试件 L2－7 曲线特点与普通混凝土对比梁及 UHPC 装配梁不同，曲线初始阶段有一小段处于弹性阶段，且初始刚度明显较低，开裂之后斜率明显下降，曲线不再为直线，22kN 时曲线开始趋于水平，破坏时梁的承载力明显降低。

4.3　荷载－跨中钢筋应变分析

根据试件梁受力主筋上黏贴的钢筋应变片测得的数据，得到如图 7 所示各试件在加载过程中的荷载－跨中钢筋应变曲线。

图 7(a)～7(h)分别为每根试验梁所有测点分别测得的荷载－应变曲线，每根试件梁均在受拉钢筋搭接段布置 6 片应变片。

L2－0 中各应变片数值在加载过程中平稳增长且在同一荷载水平下应变值相差不大，可据此判断钢筋未发生滑移；同理以 L2－0 为标准分析 UHPC 装配梁，除个别应变片过早失效以及在加载过程中应变发生突变外，剩余有效应变值在同一荷载水平下数值差值与 L2－0 相当，从而可以认为钢筋与混凝土没有发生滑移。L2－7 中 S1、S5 及 S6 在发生突变后最终逐渐稳定，且在突变前，各应变片数值基本相当，说明在混凝土后浇段钢筋与混凝土之间同样未发生滑移现象。

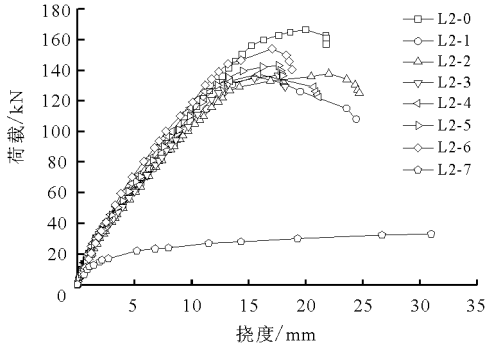


图 6　荷载－挠度曲线

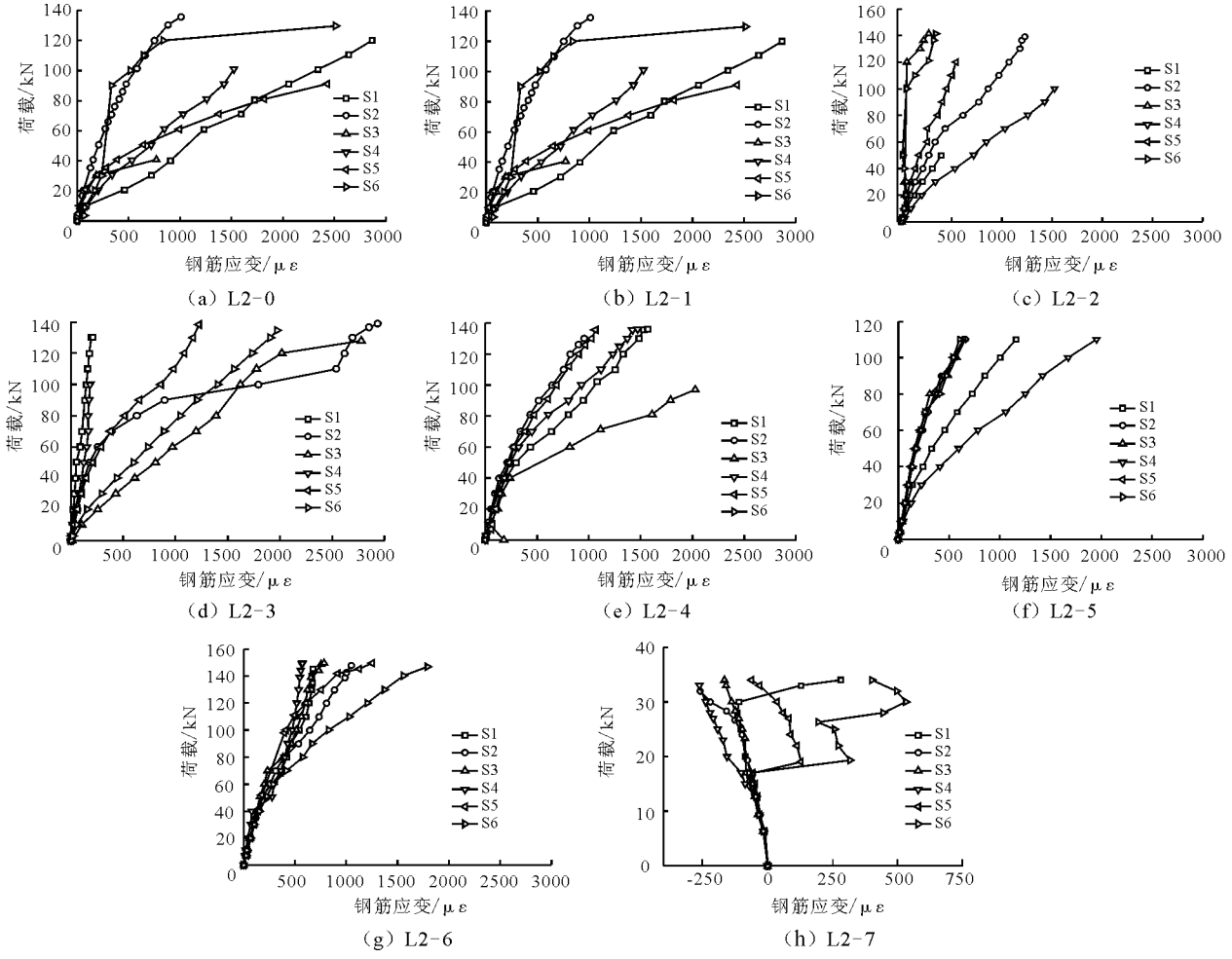


图 7　荷载－跨中钢筋应变曲线

4.4 裂缝开展与分布

试验时,对裂缝随荷载增加的分布及开展情况在梁上进行了观测及描绘,并利用裂缝宽度观测仪进行了裂缝宽度的测量。裂缝分布图见图 8,部分试件裂缝照片见图 9。

由图 8 可以看出,3 种试件梁的裂缝分布情况相似,但仍有不同。对于普通混凝土整浇梁,达到开裂荷载时首先在跨中及两加载点位置处梁底部出现弯曲裂缝,且裂缝高度较高,此后随荷载增大,在两加载点之间裂缝数量稳定增加,原有裂缝不断发展,到一定荷载值后裂缝数量基本稳定,接近屈服时加载点外侧弯剪区内开始出现细长斜裂缝,原因在于试件梁内仅配置纵筋及等间距箍筋,未对梁端部区域的箍筋进行加密,从而导致抗剪能力不足;破坏阶段受拉区形成几条宽度明显较大的主裂缝,且各条主裂缝间距基本相当。

对于 UHPC 装配梁,达到开裂荷载时裂缝首先产生于后浇界面以及加载点处梁底部,此后过程中裂缝发展与整浇梁基本相似,至破坏时在跨中后浇段左右两侧对称出现 5 ~ 6 条弯曲裂缝;区别在于,UHPC 装配梁试验过程中由于新旧混凝土黏结位置较为薄弱,导致此处开裂较早且裂缝宽度显著,裂缝沿分界线出现并且自上而下宽度基本一致,破坏时裂缝宽度较大;跨中后浇段内部由于 UHPC 高性能混凝土抗拉性能较强,试验过程中几乎无裂缝产生,预制段内竖直裂缝数量与现浇混凝土对比梁基本相当,但由于仍处于纯弯段内;后浇界面与加载点距离随搭接长度增加而减小,所以预制段竖直裂缝较为密集,裂缝间距较小。现浇混凝土对比梁由于整体性好,试件破坏时主裂缝上下贯通,受压区出现多条水平裂缝且受压区混凝土压碎导致破坏,反观 UHPC 装配梁,由于整体性及延性较差,随着搭接长度增加,受拉区弯曲裂缝延伸高度有所下降。

而对于普通混凝土后浇梁,裂缝同样首先出现在后浇界面和加载点处梁底部,此后随荷载增加,由于屈服荷载较小,裂缝迅速发展,至破坏阶段,在两加载点之间出现 8 ~ 9 条弯曲裂缝,且裂缝间距较大,显得较为稀疏,破坏时裂缝宽度极大,远大于普通混凝土整浇梁及 UHPC 装配梁。

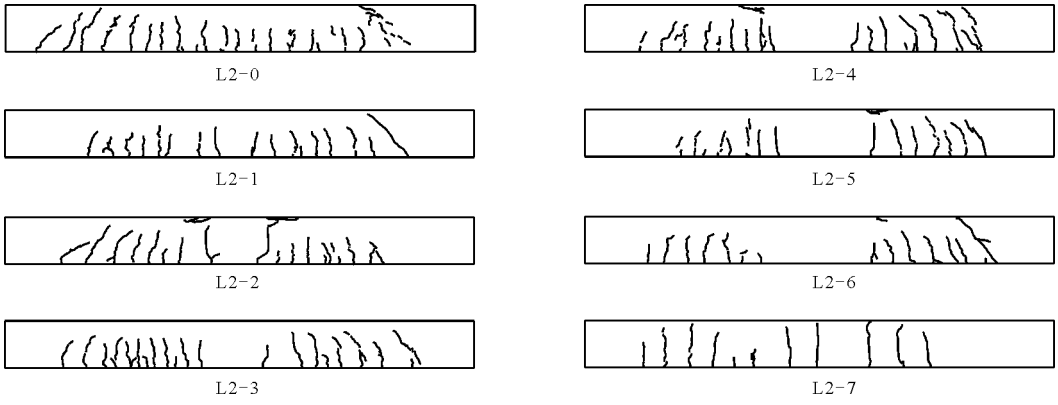


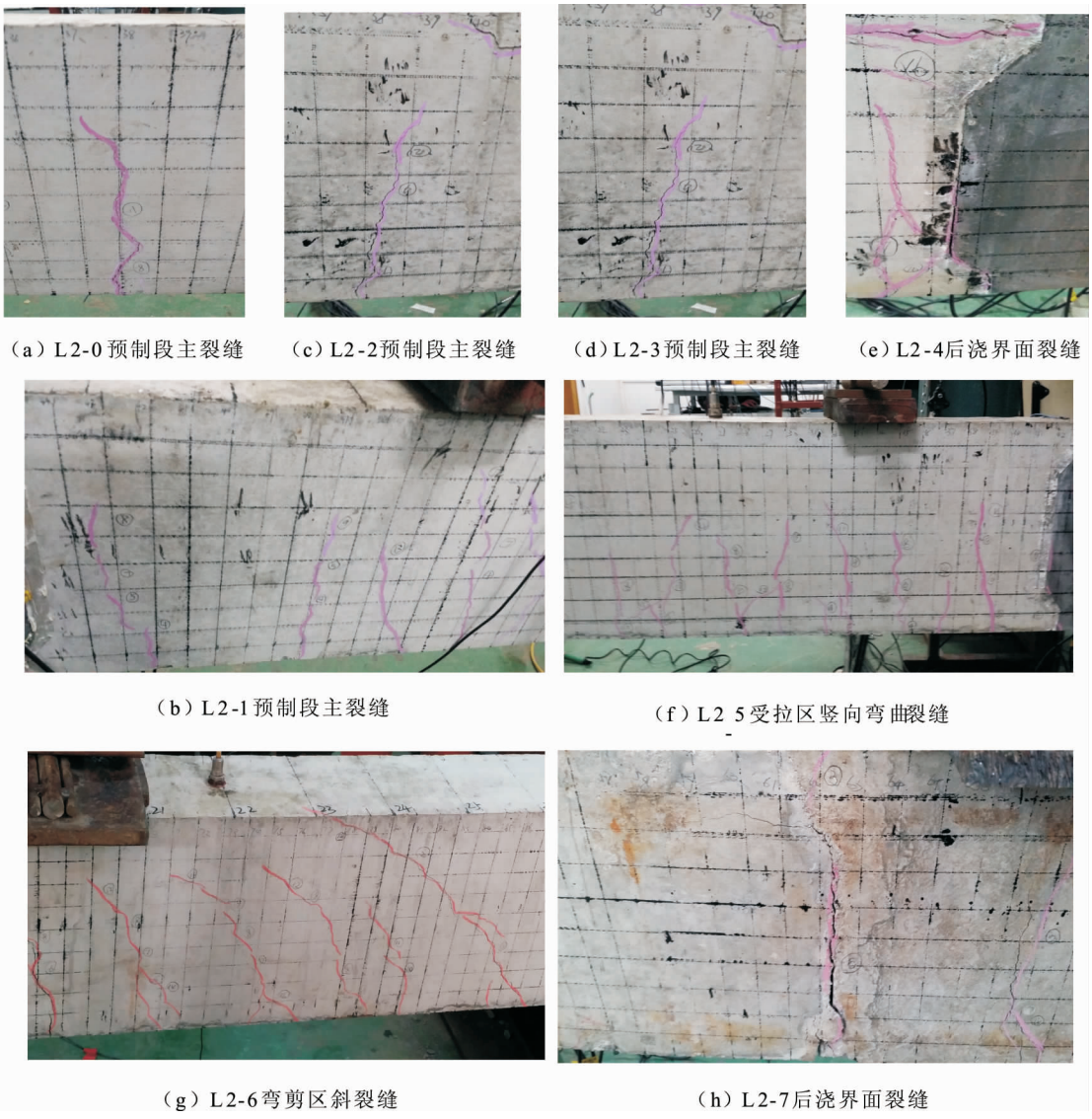
图 8 试件梁裂缝分布图

4.5 承载力及变形性能

表 5 列出了试件开裂荷载 P_{cr}、屈服荷载 P_y、极限荷载 P_u 及各自对应的跨中位移,用位移延性系数 μ 表征表征梁的延性,即 $\mu = \Delta u/\Delta y$,Δy 为梁的屈服位移,Δu 为梁的承载力开始明显下降时的挠度。

由表 5 可知,除 L2 - 1 及 L2 - 4 外,UHPC 装配梁的破坏挠度随搭接长度增加而逐渐减小,原因在于搭接长度越长,后浇段 UHPC 高性能混凝土含量越高,试件梁刚度也就越大,导致延性较差,破坏挠度较小,因而也造成 UHPC 装配梁的位移延性系数普遍较小,这一点在文献[12]、[13]中也有提及。

从表 5 可以看出,UHPC 装配梁基本在 33 ~ 35 kN 时开裂,均大于混凝土对比梁,但差别很小,说明增加搭接长度对开裂荷载影响不大;试件梁的屈服荷载及破坏荷载与钢筋搭接长度关系不大,且均远大于普通混凝土装配梁 L2 - 7。表 6 为承载能力极限状态[11]实测值与计算值的对比结果,由表 6 可知 UHPC 装配式混凝土梁的试验值与设计值的比值均大于 1.36,说明这种装配梁的承载力有足够的安全储备,承载力满足工程要求。对 L2 - 7 而言,因其试验值与计算值的比值仅为 0.375,表明装配式混凝土构件中采用后浇普通混凝土的连接方式是不可取的。



（a）L2-0 预制段主裂缝　（c）L2-2预制段主裂缝　（d）L2-3预制段主裂缝　（e）L2-4后浇界面裂缝

（b）L2-1 预制段主裂缝　（f）L2 5受拉区竖向弯曲裂缝

（g）L2-6弯剪区斜裂缝　（h）L2-7后浇界面裂缝

图 9　部分试件裂缝照片

表 5　梁的特征荷载及相应跨中位移

梁编号	P_{cr} / kN	Δ_{cr} / mm	P_y / kN	Δy / mm	P_u / kN	Δu / mm	位移延性系数 μ
L2－0	33.00	1.82	148.91	14.12	166.33	20.01	1.42
L2－1	33.67	2.10	118.71	12.16	136.00	14.55	1.20
L2－2	35.00	2.55	123.10	12.90	141.33	19.38	1.50
L2－3	34.00	2.22	119.70	11.90	139.00	19.52	1.64
L2－4	34.33	2.06	118.71	10.06	137.33	15.87	1.58
L2－5	35.00	2.22	128.73	12.34	143.00	17.62	1.43
L2－6	35.00	2.16	141.19	12.47	154.00	17.05	1.37
L2－7	15.00	2.08	23.33	6.82	32.33	26.69	3.92

表 6　承载能力极限状态实测值与理论计算结果对比

梁编号	试验值/kN	计算值/kN	试验值/计算值
L2－0	155.67	96.00	1.62
L2－1	134.00	96.00	1.40
L2－2	131.00	96.00	1.36
L2－3	134.00	96.00	1.40
L2－4	131.00	96.00	1.36
L2－5	139.00	96.00	1.45
L2－6	147.00	96.00	1.53
L2－7	36.00	96.00	0.38

5　结　论

通过对 8 根试验梁试验过程及试验数据的对比,得出以下结论:

(1)UHPC 装配梁加载过程中也经历了弹性、纵筋屈服、受压区破坏等阶段,表现出适筋梁的破坏特征,破坏时裂缝形态及裂缝数量与混凝土对比梁相似,裂缝分布均匀,但裂缝间距随搭接长度增加有所

减小,后浇界面裂缝显著,但后浇段内部裂缝极少。

(2)UHPC 装配梁加载过程中符合平截面假定,搭接长度从 15 d 开始可以认为钢筋与混凝土没有发生滑移状况。

(3)UHPC 装配梁承载力实测值与计算值的比值均大于 1.36,具有足够的承载力安全储备,满足工程要求,增加钢筋搭接长度对提高 UHPC 装配梁的开裂荷载影响不大。

(4)UHPC 装配梁在开裂荷载、屈服荷载、极限荷载等方面均明显优于普通混凝土装配梁,搭接长度为 10 d 时,承载力和变形能力已和现浇混凝土对比梁比较接近,且随着搭接长度增加,性能提高不大,因此当搭接长度为 10 d 时,已能够满足设计和施工需求。

参考文献:

[1] 刘 琼,李向民,许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术,2014,43(22):9 - 14 + 36.

[2] 徐海宾,邓宗才. 超高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J]. 世界桥梁,2012,40 (3) : 63 - 67.

[3] Graybeal B, Tanesi J. Durability of an ultra - high performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2007,19(10) : 848 - 854.

[4] 宋国华, 霍 达, 王东炜, 等. 装配式大板结构竖向齿槽接缝受剪承载力设计[J]. 土木工程学报, 2003,36(11): 61 - 64.

[5] 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.

[6] 张大长,支正东,卢中强,等. 外壳预制核心现浇 RC 梁抗弯承载力的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 164 - 170.

[7] 李 坚,陆元春. 预制节段混凝土桥梁的设计与工程实践[C]//. 第七届后张拉预应力学术交流会, 2002.

[8] 刘昌永,王庆贺,王玉银,等. 带钢接头的装配式钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2013, 34(S1):208 - 214.

[9] 徐海滨,邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验[J]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4):87 - 92.

[10] 孙文彬,田洪斌,王锦力. 装配预制梁抗弯承载力试验研究[J]. 工业建筑,2015, 45(2):57 - 61.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.

[12] 邓宗才,王义超,肖 锐,等. 高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能试验研究与理论分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015,23(1):68 - 78.

[13] 冯素丽. 钢筋超高性能混凝土梁延性性能试验研究[D]. 西安:长安大学,2014.

(上接第 188 页)

参考文献:

[1] 顾四行. 我国有关水机磨蚀研究和防护措施[J]. 水力发电学报, 1991,10 (3): 27 - 38.

[2] 王金国. 水工建筑物的破坏及防治措施研究[D]. 成都:四川大学,2002.

[3] 郝枫楠. 水工混凝土抗冲磨性能评价方法研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.

[4] 王志高. 我国水轮机磨蚀的现状和防护措施的进展[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(3): 1 - 4.

[5] 彭恩高. 材料的含沙水流冲蚀磨损性能研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2006.

[6] Gandhi B K,Singh S N,Seshadri V. Study of the parametric dependence of erosion wear for the parallel flow of solid - liquid mixtures[J]. Tribology International, 1999, 32(5):275 - 282.

[7] 蒋硕忠. 聚合物抗磨蚀材料的研究与应用[J]. 长江科学院院报,1993,10(2):73 - 77.

[8] Woodford D A. Cavitation - Erosion - Induced Phase Transformations in Alloys[J]. Metallurgical Transactions, 1972(3):1137 - 1145.

[9] 姚启鹏. 泥沙粒径级配对材料磨损影响的试验研究[J]. 水力发电学报, 1997, 16(1): 87 - 94.

[10] 余江成, 姚启鹏, 吴 剑. 河流泥沙颗粒特性对磨损影响的研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(11):37 - 39.

[11] 黄细彬. 高速含沙掺气水流及磨蚀机理的研究[D]. 南京:河海大学,2001.

[12] 邓 军, 杨永全, 沈焕荣,等. 水流含沙量对磨蚀的影响[J]. 泥沙研究, 2000(4):65 - 68.

[13] 程则久. 空化和磨蚀中临界含沙量的试验研究[J]. 水利水电技术, 1990, 21(2): 57 - 63.