



以UHPC材料连接的预制装配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. 上海建工二建集团有限公司 上海 200080

摘要: 为进一步研究UHPC预制装配梁的受弯性能, 设计了4根梁进行静力加载试验, 包括2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, 正常工作状态下裂缝发展缓慢且宽度较小, 达到屈服后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1.40, 与整浇混凝土在同一水平范围内, 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装配梁的承载力及变形能力影响不大, 当搭接长度为10d时, UHPC装配梁的受弯性能基本与现浇混凝土对比梁相当, 能够满足工程需求。

关键词: UHPC装配梁; 受弯性能; 破坏形态; 承载力; 变形能力

中图分类号: TU528.31

文献标志码: B

DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2016.12.028

Study on Flexural Performance of Prefabricated Beam Connected with UHPC Material

FENG Junxiao¹ ZHENG Qizhen¹ LONG Libo² CHEN Gang¹

1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science & Technology Shanghai 200093;

2. Shanghai Construction No.2 (Group) Co., Ltd. Shanghai 200080

本文以间接搭接连接方式为基础, 通过在后浇带应用超高性能混凝土UHPC材料代替钢筋套筒灌浆连接, 得到UHPC装配式混凝土梁, 随后再通过对装配梁进行静力加载试验, 研究搭接长度对UHPC装配梁破坏形态、承载能力、变形性能等受弯性能的影响^[1]。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计4根试件梁, 包括2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。L1为C40混凝土整浇梁, L2、L3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10d (d 为底部受拉纵筋直径)、20d, L4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6 mm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见图1, 试验梁设计参数见表1, 钢筋的力学性能见表2, 混凝土立方体抗压强度见表3。

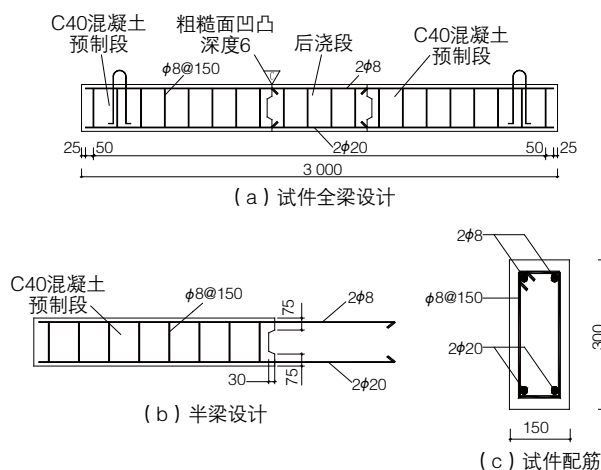


图1 试件梁设计及配筋示意

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/ mm	保护层 厚度/ mm	箍筋/ mm	架立 钢筋/ mm	搭接 长度/ mm
L1	C40现浇	150 × 300	3 000	2C20	25	B8@150	2B8	整浇梁
L2	C40预制、UHPC后浇	150 × 300	3 000	2C20	25	B8@150	2B8	10d=200
L3	C40预制、UHPC后浇	150 × 300	3 000	2C20	25	B8@150	2B8	20d=400
L4	C40预制、C50后浇	150 × 300	3 000	2C20	25	B8@150	2B8	35d=700

1.2 加载方案及测点布置

1) 钢筋应变片布置。在2根受拉纵筋搭接段布设应变

基金项目: 上海高等职业教育质量提升计划项目(2015-01-001)。

作者简介: 冯军骁(1991—), 男, 在读硕士。

通信地址: 上海市杨浦区军工路516号(200093)。

收稿日期: 2016-11-01



表2 钢筋的力学性能

钢筋类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/ ($\times 10^5$ MPa)
C8	431.61	712.68	2.16
C20	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

片S1~S3和S4~S6, 分别位于搭接段中点及两侧等间距处, 用来测量加载过程中底部受拉钢筋的应变变化情况, 从而判断搭接钢筋是否存在滑移现象(图2)。

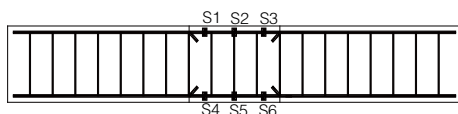


图2 钢筋应变片布置

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, 从而判断是否满足平截面假定, 具体粘贴位置如图3所示。

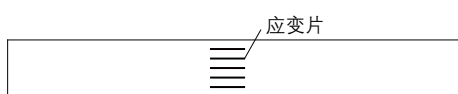


图3 混凝土应变片布置

3) 加载装置。为消除剪切段的影响, 试验采用三分点静力加载, 中间形成长1 000 mm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地施加于试件梁。为防局部受压破坏, 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, 跨中放位移计测量跨中挠度, 两端支座处对称放置位移计, 以测量支座位移从而消除支座沉降误差。

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 Q_s (约10 kN)的20%, 分5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 Q_s 的10%; 加载到计算开裂荷载 F_a 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_b 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_b 的5%。

2 试验现象及破坏过程

试件L1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L3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 mm和3.69 mm, 破坏挠度为19.52 mm。

试件L4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, 至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。

3 试验结果及分析

3.1 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L3为例, 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地符合平截面假定(图4)。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。

3.2 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5所示加载过程中各试验梁的荷载-挠度曲线。

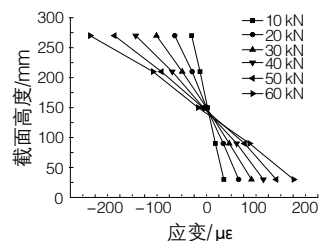


图4 混凝土应变沿梁高分布

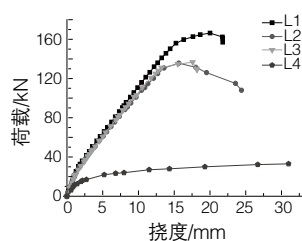


图5 荷载-挠度曲线

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; 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。由图5可以看出, 随着搭接长度增加, UHPC装配梁承载力有所提高, 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, 跨中最大挠度处变得更为平缓, 所以破坏挠度小于普通混凝土整浇梁。试件L4曲线特点与普通混凝土对比梁及UHPC装配梁不同, 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, 至22 kN时曲线开始趋于水平, 破坏时梁的承载力明显降低。

3.3 荷载-跨中钢筋应变分析

根据试件梁受力主筋上粘贴的钢筋应变片测得的数据, 得到如图6所示各试件在加载过程中的荷载-跨中钢筋应变曲线。图6(a)~(d)分别为每根试验梁所有测点分

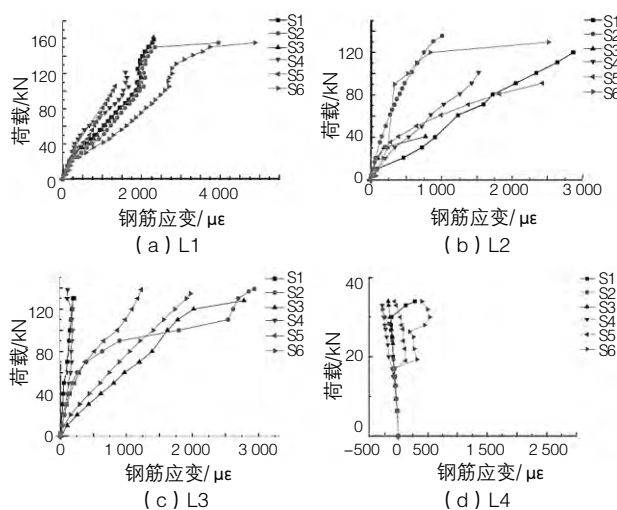


图6 荷载-跨中钢筋应变曲线

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。

L1中各应变片数值在加载过程中平稳增长, 可以此为标准判断UHPC装配梁是否发生滑移; 对于L2、L3, 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L1相当, 从而可以认为钢筋与混凝土没有发生滑移。L4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明显滑移现象。

3.4 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。最终的裂缝分布见图7。

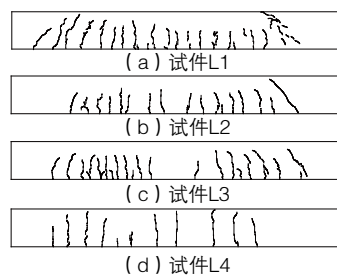


图7 试件梁裂缝分布

由图7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,但在达到屈服荷载前正常工作状态下,裂缝发展缓慢且裂缝宽度较小;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。

3.5 极限承载力及变形能力

表4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 表征梁的延性,即 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, Δ_y 为梁的屈服位移, Δ_u 为梁的承载力开始明显下降时的挠度。

由表4可知, 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[2]、[3]中也有所提及。

从表4还可以看出, 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;而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L4。

表5为承载力极限状态实测值与计算值的对比结果,本文以挠度达到 $l_0/30$ 作为承载力极限状态^[4]。

由表5可知, UHPC装配式混凝土梁的试验值与设计值的比值均大于1.40,说明这种装配梁的承载力有足够的安

表4 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	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	位移延性系数 μ
L1	33.00	1.82	148.91	14.12	166.33	20.01	1.42
L2	33.67	2.10	118.71	12.16	136.00	14.55	1.20
L3	34.00	2.22	119.70	11.90	139.00	19.52	1.64
L4	15.00	2.08	23.33	6.82	32.33	26.69	3.92

表5 承载力极限状态实测值与理论计算结果对比

梁编号	试验值/MPa	计算值/MPa	试验值/计算值
L1	155.67	96.00	1.62
L2	134.00	96.00	1.40
L3	134.00	96.00	1.40
L4	36.00	96.00	0.38

全储备,承载力满足工程要求。对L4而言,因其试验值与计算值的比值仅为0.38,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。

4 结语

通过对4根试验梁试验过程及试验数据的对比,得出以下结论^[5]:

1) UHPC装配梁在纯弯段内部,搭接区外的裂缝数量、裂缝分布与混凝土整浇梁相似,在后浇段内部几乎无裂缝产生,而沿后浇界面,裂缝显著且裂缝宽度较大。由此可见,在正常工作状态下UHPC装配梁裂缝发展缓慢且裂缝宽度较小,满足裂缝要求。

2) UHPC装配梁在同一荷载水平下,钢筋应变值的差值与混凝土整浇梁的钢筋应变差值相差不大,可以认为加载过程中不受钢筋滑移因素的影响。

3) UHPC装配梁在承载力、变形能力上与混凝土整浇梁在同一水平范围内,性能基本相当,改变钢筋搭接长度后影响并不显著,因此当搭接长度为10d时,已能够满足工程要求。

4) 普通混凝土装配梁性能与混凝土整浇梁、UHPC装配梁相差较大,不能满足工程需求。

【参考文献】

- [1] 张伟.装配整体式混凝土结构钢筋连接技术研究[D].西安:长安大学,2015.
- [2] 邓宗才,王义超.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(1):69-78.
- [3] 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.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 徐海宾,邓宗才.UHPC梁开裂弯矩和裂缝试验[J].哈尔滨工业大学学报,2014(4):87-92.