

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812126

带 ECC 底板的装配式梁受弯性能及损伤分析

崔涛¹,何浩祥¹,闫维明¹,钱增志²,周大兴²

(1. 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘要:为改善目前装配式叠合梁常存在后浇区易开裂、构件延性较差、易损伤等缺点,将工程水泥基复合材料(ECC)应用于叠合梁的底板及后浇区,进行了11个梁试件的纯受弯试验.研究该种试件受弯性能及ECC板厚度、钢筋连接方式、配筋率等因素对其受弯性能的影响;分析其特征点的承载力与位移,测量试件的裂缝宽度及其发展趋势并分析损伤演化规律.结果表明:带有ECC底板和后浇拼缝的装配式梁比普通混凝土梁开裂、屈服、极限状态下的荷载及位移及试件延性均有提高,且ECC底板越厚,提高作用越显著;采用套筒或环箍-插筋的方式均可有效传递钢筋应力;采用带ECC底板的装配式梁可有效控制纯受弯区裂缝宽度,且其破坏时损伤指数更大.其在损伤严重时仍可承受荷载,适合应用于装配式结构的关键节点.

关键词:装配式混凝土;叠合梁;ECC;裂缝控制;损伤分析

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0104-09

Bending performance test and damage analysis of precast beams with ECC plate

CUI Tao¹, HE Haoxiang¹, YAN Weiming¹, QIAN Zengzhi², ZHOU Daxing²

(1. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structure Retrofit (Beijing University of Technology), Beijing 100124, China;

2. China Railway Construction Group Co. Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of precast composite beams, such as easy cracking in post-cast zone, poor ductility, and easy to damage, engineering cementitious composites (ECC) were used in the precast plate and post-cast area of composite beams. Bending tests were carried out on 11 beam specimens. The flexural properties and effects of the ECC plate thickness, connecting method of reinforcement, and reinforcement ratio on the flexural properties were investigated. Bearing capacity and displacement of its characteristic point were studied. The crack width was measured and the laws of crack development trend and damage evolution were analyzed. The results show that the load, displacement, and ductility of the precast beams with ECC plate and post-cast joints under cracking, yielding, and ultimate condition were higher than those of RC beams. The thicker the ECC plate was, the more significant the effect was. The reinforcement connection methods of steel sleeve and hoop-inserting could effectively transfer the reinforcement stress. The precast beam could effectively control the crack width in bending area, and the damage index was larger when it was damaged. However, it could still bear load when the damage was serious, which is suitable for the key joint of precast structure.

Keywords: precast concrete; composite beam; ECC; crack control; damage analysis

装配式混凝土结构(precast concrete structure, 简称PC结构)因具有施工效率高、质量易控制、对环境影响较小等优点,而被广泛应用于大中型工业及民用建筑的建造^[1-2].在PC结构中,若梁构件跨度或体积较大,不便于运输,通常是将其分段预制好后送至现场进行组装.同时,为增强结构的整体性,通常将梁底板在PC工厂预制好后,现场在面层浇筑混凝土,制成叠合构件.图1为JGJ1—2014《装配式混凝土结构技术规程》^[3]推荐工程中采用的装配整体式叠合梁的制作方式.

此种制作方式虽然可在最大程度上保证装配式结构的整体性,但仍有易开裂、延性差及易损伤等问题,成为制约PC结构发展和推广的制约因素.将高延性水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)应用于装配式叠合梁中成为一种较为实用的解决方案.ECC是一种具有受拉应变硬化特性的复合材料,加入体积掺量2%的聚乙烯醇(PVA)纤维即具有3%以上拉伸应变,在受拉时可产生系列细小裂缝并具有多裂缝开展的特征.因此,用该种材料取代传统混凝土制作叠合梁的底板和后浇区可起到增强试件韧性、阻止裂缝产生及发展的作用,对提高PC结构质量和促进其推广应用将大有裨益^[4].目前国内外针对ECC材料在PC结构中的应用已展开了一系列研究:如ECC装配式剪力墙、梁柱节点、连梁等^[5-9].将ECC材料应用于叠合

收稿日期: 2018-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500600);

中铁建设集团有限公司科技发展计划(LX16-07)

作者简介: 崔涛(1991—),男,博士研究生;

何浩祥(1978—),男,教授,博士生导师

通信作者: 何浩祥, hhx7856@163.com

梁底板或装配式梁的后浇区也有少量研究:如丁然等^[10]研究了带 ECC 后浇区的 PC 梁在不同钢筋连接及界面处理方式的条件下力学性能及裂缝开展情况,得出了采用节点区或梁端塑性铰区均采用 ECC 材料可显著提升梁承载力与延性的结论.文献[11-13]对带 ECC 底板的叠合梁试件进行了研究,认为带 ECC 底板的梁可起到阻止裂缝产生和发展、提高试件变形能力的作用.然而目前关于对 ECC 后浇层厚度、配筋率等因素对其力学性能的影响方面

的研究较少见,而该部分研究对于优化带 ECC 底板的 PC 梁的设计与工程推广有着较重要的理论与实践意义.此外,目前 PC 结构中的钢筋连接方式主要包括套筒连接、约束箍筋搭接、焊板连接、焊接连接等,一般认为其性能等同于钢筋贯通,但实际效果各不相同且相关机理不尽明确,因此研究采用不同纵筋连接方式对叠合梁力学性能的影响也具有较重要的意义.

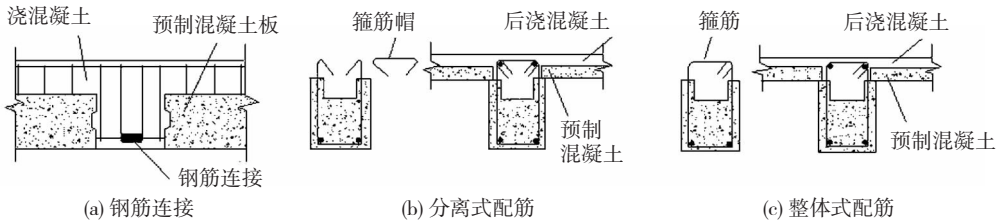


图 1 叠合梁制作方法

Fig. 1 Composite beam processing method

综上,本文通过试验和理论分析研究了在单向分级荷载作用下带 ECC 底板和后浇带的梁试件由不同配筋率、ECC 厚度、纵筋连接方式等因素对梁试件承载力、延性及破坏模式等的影响,总结了试件的裂缝宽度发展的变化规律,并分析了试件的刚度退化及损伤演化规律.

1 试验方案

1.1 试件设计及制作

本文结合 JGJ 1—2014 对于 PC 梁制作建议,将具有受拉硬化性质的 ECC 材料用于梁的受拉区,以期取得增强试件延性与韧性的效果,并考虑 ECC 底板及后浇区的厚度,钢筋的连接方式及配筋率等因素,共设计 11 根试验梁.试件的详细参数见表 1.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

编号	h_e /mm	h_p /mm	ρ /%	钢筋连接
RC1	0	0	0.76	贯通
RC2	0	0	1.57	贯通
PT40-1	40	40	0.76	套筒连接
PT40-2	40	40	1.57	套筒连接
PT80-1	80	80	0.76	套筒连接
PT80-2	80	80	1.57	套筒连接
PH80-1	80	80	0.76	焊接连接
PG80-1	80	80	0.76	套箍连接
PT120-1	120	120	0.76	套筒连接
PT140-2	120	120	1.57	套筒连接
PT120-3	120	240	1.57	套筒连接

表 1 中 h_e 为预制 ECC 底板厚度, h_p 为 ECC 后浇区厚度.表中 RC1、RC2 为普通 RC 梁,作为对比试件.对于装配式叠合梁,编号前两位字母表示纵筋连接方式:其中 PT 表示套筒连接、PG 为套箍连接、PH 为钢筋焊接连接,之后数字表示 ECC 底板厚度,“-”后的数字表示配筋率种类,例如,PT40-1 表示试件纵钢采用套筒连接,ECC 底板厚度为 40 mm,配筋率为 0.76%.以 PG80-1 为例,试件尺寸及配筋见图 2.

试件在跨中纯弯区未配置腹筋,为保证试件不发生剪切破坏,在两端弯剪区配置 8@100 的腹筋.梁截面均为 $b \times h = 120 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$,混凝土保护层厚度 $c = 20 \text{ mm}$,梁长 $l = 1.8 \text{ m}$,计算长度 $l_0 = 1.5 \text{ m}$.试件制作时,将叠合面凿毛处理以避免叠合面处发生剪切滑移.

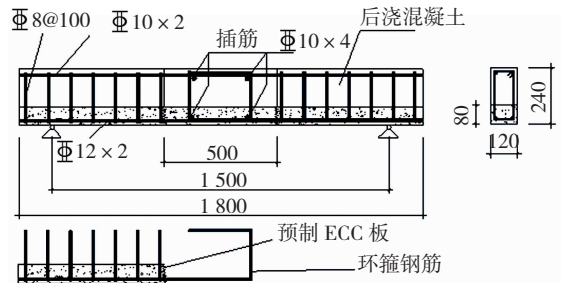


图 2 PG80-1 试件详图

Fig. 2 Detail and reinforcement of PG80-1

1.2 材料性能

考虑性能需求和经济性,选用体积掺量 2% 的 PVA 纤维,基体由普通硅酸盐水泥 (PO42.5R)、粉煤灰、精制中砂(要求过筛,筛孔直径 $< 380 \mu\text{m}$)、水及聚羧酸减水剂组成.ECC 具体成分见表 2.通过单轴受拉和受压试验,本文所采用的 ECC 材料单轴拉

伸极限应变可达为 3.7%, 立方体抗压强度达 44.4 MPa, 极限拉应力为 3.3 MPa. C40 的混凝土立方体抗压强度为 42.1 MPa.

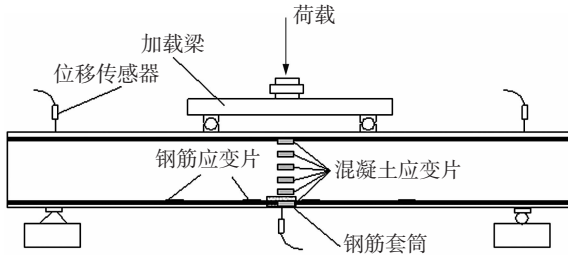
表 2 ECC 成分表
Tab.2 ECC component

水泥/ (kg/m ³)	粉煤灰/ (kg/m ³)	砂/ (kg/m ³)	水/ (kg/m ³)	减水剂/ (g/m ³)	纤维/ (kg/m ³)
475	700	415	400	45	26

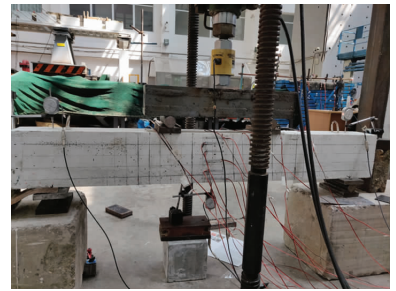
1.3 试验与测量装置

试验采用 50 t 千斤顶实现四点分级加载, 裂缝产生前采用力控制方式, 每 2 kN 为一级, 裂缝产生

后, 每 5 kN 为一级, 加载至钢筋屈服. 屈服后以屈服位移为一加载级, 采用位移控制加载方式, 直至承载力降低至峰值荷载的 85% 时认为试件破坏. 每级加载完成后持续 10 min, 稳定后采用电子显微镜观测裂缝宽度. 采用位移传感器分别测量试件的跨中、两侧支座处的位移. 对于 RC 试件, 在钢筋中点及两侧 1/3 跨处布置电阻应变片测量纵筋应变, 对于装配式试件, 在钢筋连接两端布置应变片以测量连接梁端钢筋变形的协调性. 梁跨中混凝土沿高度方向布置 6 个混凝土应变片, 梁顶端和梁底端分别布置两个混凝土应变片. 试件加载装置及数据测点见图 3.



(a) 加载装置示意



(b) 加载现场

图 3 试件加载与数据测量装置

Fig. 3 Loading and data measuring device

2 结果及分析

2.1 破坏形态

部分试件的破坏形态见图 4. 在较低配筋率下, RC 试件的裂缝首先出现在受弯区梁底, 然后弯剪区出现斜裂缝并向受压区延伸, 加载初期裂缝比较均匀, 钢筋屈服后几乎不会产生新的裂缝, 主裂缝开始迅速开展. 当上部混凝土受压破坏时, 试件还能承受部分荷载, 但下降严重.

对于 PC 试件, 当荷载较小时后浇拼缝即出现开裂, 钢筋屈服之前, 该裂缝成为试件主要裂缝, 纯受弯段裂缝仍然均匀分布, 但平均宽度较 RC 试件

更小. 梁底裂缝分布见图 5. 钢筋屈服后, 套筒连接的 PC 试件由于套筒处钢筋变形较小, 跨中裂缝分布较为均匀, 试件主裂缝均在套筒边缘钢筋应变较大处产生, 且主裂缝是在试件达到峰值荷载后产生的. 峰值荷载后主裂缝迅速开展, 初始的界面裂缝宽度几乎不变. 试件破坏时的主裂缝及界面裂缝见图 6. 对于采用套筒连接的试件, 为保证搭接长度, 跨中钢筋截面积局部变大, 试件承载力提高, 变形能力降低, 裂缝的产生和发展更为缓慢, 且主裂缝产生于跨中位置. 对于钢筋采用焊接连接的试件, 裂缝发展较轻微, 破坏是由于钢筋焊接处断裂引起的, 因此不建议在 PC 结构中采用.

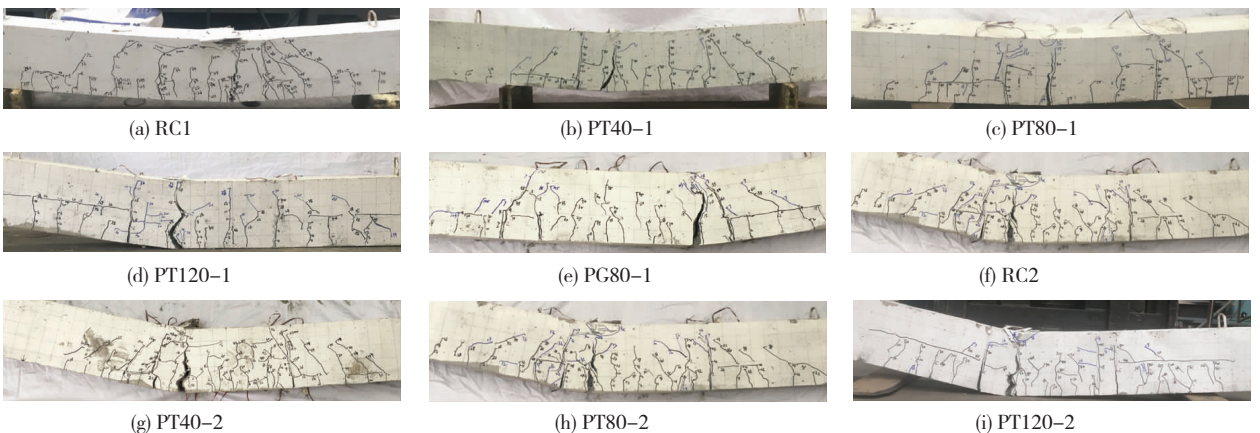


图 4 试件破坏现象

Fig. 4 Failure phenomenon of specimens

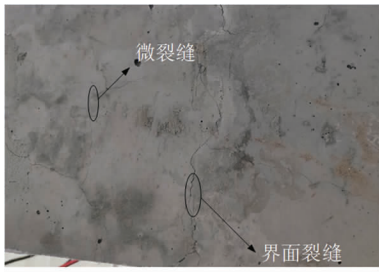


图 5 加载初期梁底裂缝

Fig. 5 Crack at beam bottom at initial loading stage



图 6 破坏时主裂缝及界面裂缝比较

Fig. 6 Comparison of main crack and interface crack

2.2 荷载 - 挠度曲线

各种试件的荷载 - 挠度曲线及力学性能参数见图 7 及表 3。表中 F_{crf} 、 F_{crb} 分别为试件界面裂缝及受弯裂缝产生时的荷载, Δ_{cr} 为受弯区产生裂缝时的跨中挠度, F_y 、 F_p 、 F_u 分别为试件开裂、峰值、极限荷载, Δ_y 、 Δ_p 、 Δ_u 分别为其对应的跨中挠度。 μ 为延性系数。

从表 3 可知: PC 试件后浇拼缝处开裂荷载较低, 但受弯区开裂荷载显著提高, ECC 材料阻裂作

用明显。PC 试件破坏时极限位移普遍提高, 且 ECC 层越厚, 提高越明显, 当配筋率较高时提高更显著。下文将对各因素对荷载 - 挠度曲线的影响进行详细分析。

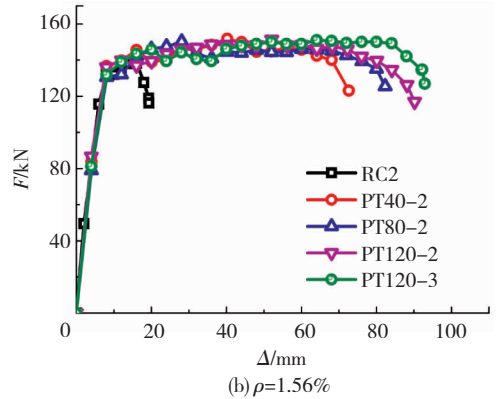
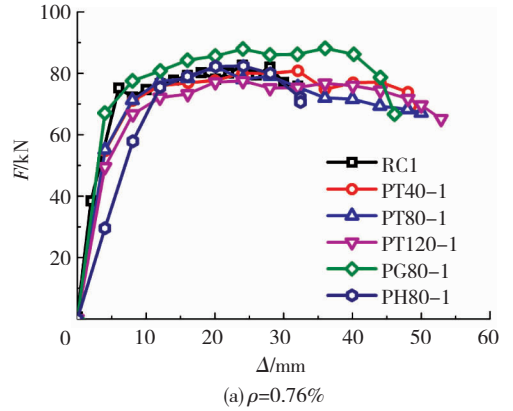


图 7 试件荷载 - 挠度曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of specimens

表 3 试件力学性能参数

Tab. 3 Mechanical properties parameters of specimens

编号	F_{crf}/kN	F_{crb}/kN	Δ_{cr}/mm	F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_p/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	μ
RC1	—	19.29	0.37	45.86	4.20	84.82	21.26	72.10	34.26	7.23
RC2	—	23.18	0.33	108.99	4.54	138.95	14.59	118.10	19.34	3.49
PT40-1	12.75	31.28	0.34	48.50	4.25	81.94	23.32	69.65	45.18	10.67
PT40-2	15.20	37.93	0.40	112.25	4.78	151.32	48.84	128.61	72.63	14.08
PT80-1	14.15	34.16	0.36	52.14	4.47	82.98	22.21	70.53	47.72	10.89
PT80-2	12.90	37.21	0.45	113.40	5.04	152.09	33.95	129.27	78.15	15.50
PH80-1	11.55	33.98	0.43	44.35	8.79	77.27	25.11	65.67	27.14	3.09
PG80-1	17.15	36.65	0.51	61.64	3.52	89.47	26.12	76.05	42.36	12.03
PT120-1	13.15	34.21	0.36	56.40	4.62	81.58	24.47	68.49	51.70	11.32
PT120-2	14.30	35.33	0.45	125.77	5.88	153.25	49.86	82.50	82.50	16.39
PT120-3	13.55	35.44	0.45	113.44	5.59	151.73	69.69	92.92	92.92	16.62

2.3 配筋率的影响

对于 RC 梁, 如果配筋率提高, 一般情况下试件的承载力提高但延性降低, 但采用 ECC 后浇节点和预制底板的试件, 其承载力及延性会呈现同时升高

的趋势: 如 PT120-1 与 PT120-2 为两个 ECC 厚度和钢筋连接方式均相同, 配筋率不同的 PC 试件。其受弯区开裂荷载提高不明显, 但 PT120-2 的峰值荷载提高 1.8 倍的同时, 极限位移提高 1.6 倍, 延性系

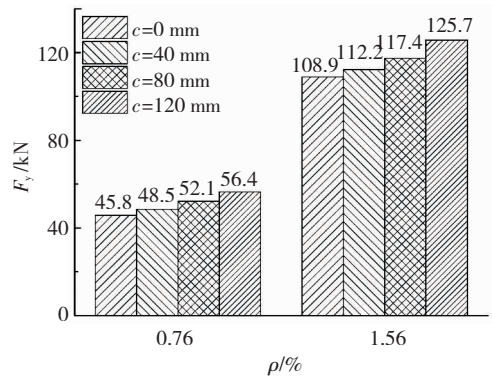
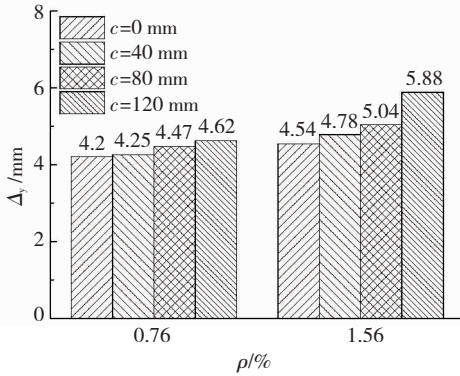
数 μ 较 PT120-1 也提高了 1.44 倍,对比 PT40-1 和 PT40-2、PT80-1 和 PT80-2,均可发现类似规律.

2.4 钢筋连接方式的影响

PT80-1、PG80-1、PH80-1 为配筋率与 ECC 板厚相同,钢筋分别采用套筒、焊接、套箍连接的 3 个试件. PG80-1 屈服位移、峰值位移和极限位移均比 PT80-1 有所下降,但极限承载力较 PT80-1 提高了 1.08 倍,PH80-1 加载初期刚度较低,屈服荷载和屈服位移均较其他试件提高 1.7~2.1 倍,但采用该种连接的试件变形能力和延性均较差,质量难控制,不宜在工程中采用.

2.5 ECC 底板厚度的影响

ECC 底板厚度对试件的屈服荷载和屈服位移影响见图 8. 对钢筋连接及配筋率相同的试件,ECC 板越厚,屈服位移与屈服荷载越高. 以配筋率 1.56% 试件为例:ECC 板厚为 40、80、120 mm 的梁试件分别比混凝土梁试件 RC2 的屈服荷载高 1.03、1.04、1.15 倍,屈服位移高 1.05、1.12、1.29 倍. 从表 3 可看出 ECC 板厚对试件峰值承载力影响较小且无一定规律性. 试件的极限位移和延性系数见图 9,可认为试件 ECC 板越厚,极限位移和延性系数均有所提高.

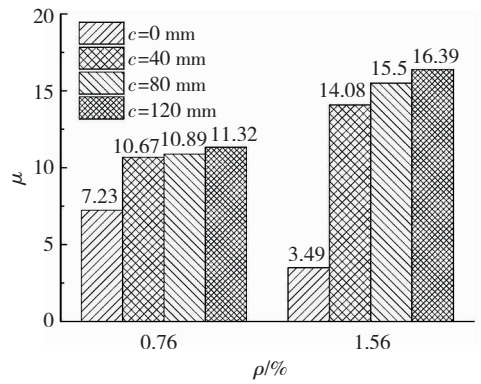
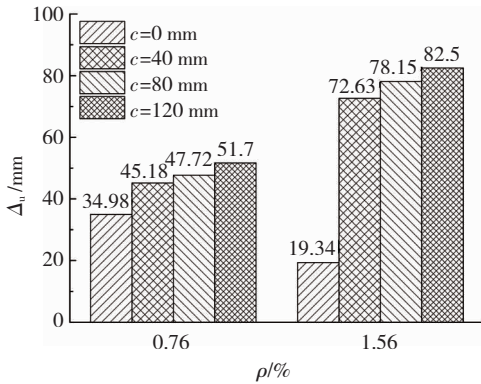


(a) ECC 板厚对屈服位移的影响

(b) ECC 底板对屈服荷载的影响

图 8 ECC 板厚对屈服位移及屈服荷载的影响

Fig. 8 Effect of ECC thickness on yield load and yield displacement



(a) ECC 板厚对极限位移的影响

(b) ECC 板厚对延性系数的影响

图 9 ECC 板厚对极限位移及延性系数的影响

Fig. 9 Effect of ECC thickness on ultimate displacement and ductility

2.6 荷载-钢筋应变及曲线

以配筋率为 0.76% 的 5 个试件来说明钢筋应变变化规律:如图 10 所示,混凝土开裂前,各试件纵筋应变差别不大,但试件开裂后,试件发生应力重分布. 带裂缝工作时,RC1 的钢筋应变突然增大,带有 ECC 底板的试件钢筋应变较小,表明 ECC 中的纤维在试件受弯过程中起到了受拉作用,延缓了钢筋变形. 荷载相同时,ECC 厚度 80 mm 的试件钢筋应变较厚度 120 mm 的试件应变略大,幅度在 5.1%~7.3%. 采用 ECC 后浇节点可防止钢筋应变过大,延缓梁试件破坏.

2.7 连接钢筋及钢筋-ECC 协同变形能力验证

钢筋连接端口两侧钢筋的应变见图 11. 结果表明套筒两侧钢筋的应变几乎是同步的,除采用焊接连接的钢筋在应变较大时连接两侧的钢筋应变有一定差异,采用套筒或套箍连接在钢筋受力全过程均可以很好传递钢筋应力,因此在计算时可将钢筋连接等效为整体钢筋.

以试件 PT80-1 中的钢筋和 ECC 的应变发展来说明二者的协同变形性能,结果见图 12. 裂缝产生前 ECC 应变与钢筋应变几乎相同,当 ECC 开裂后二者略有差别,但二者的应变差距在 15% 之内,

因此可认为二者在荷载作用下可协调变形,没有明显的滑移.

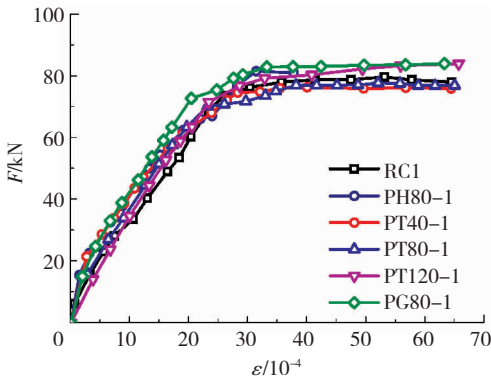


图 10 荷载与钢筋应变的关系

Fig. 10 Relationship between load and strain of rebar and concrete

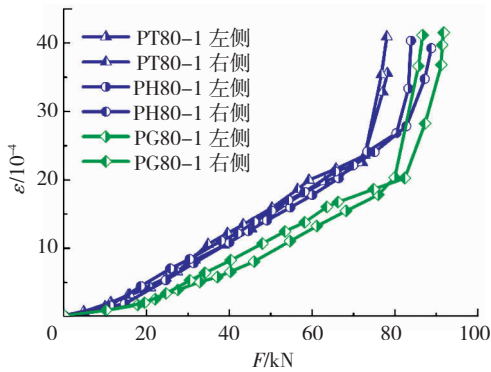


图 11 钢筋连接两端应变对比

Fig. 11 Comparison of strain between ends of rebars

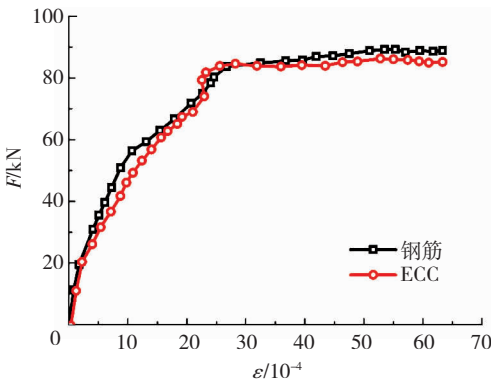


图 12 钢筋与同位置 ECC 应变对比

Fig. 12 Strain comparison between rebar and its corresponding ECC

3 裂缝演化及宽度控制

为保证结构的耐久性并避免因裂缝过宽导致气体、水及其他化学物质侵入裂缝造成钢筋的锈蚀,在实际工程中,一般裂缝宽度都需进行控制,如 ACI318 中一般对于室内裂缝限值为 0.41 mm,室外环境裂缝限值为 0.33 mm,而中国的混凝土规范 GB 50010 中对于不同环境条件下的最大裂缝宽度也有严格限制,ECC 材料的优势在于实现受拉应变硬化的同时也能实现多缝开裂,有利于控制裂缝宽度,因

此对采用 ECC 的 PC 梁的开裂点和裂缝控制进行研究有重要意义.

3.1 开裂点的选取

以试件 RC1 和试件 PT80-1 为例来说明开裂点的选取,图 13(a)和(b)分别为不同试件梁底两个应变片荷载-应变关系曲线.在荷载较小时应变是近似均匀分布的.随着荷载加大,其中一个应变片的应变突然增大,表明裂缝从该应变片覆盖的区域内开展,以该分叉点作为试件的开裂点,而该突变的大小程度则可反映微裂缝的开展程度.从图 13 可看出,试件 PT80-1 突变较小,试件 RC1 突变较大,表明 PVA 纤维具有阻止裂缝发展的性能.

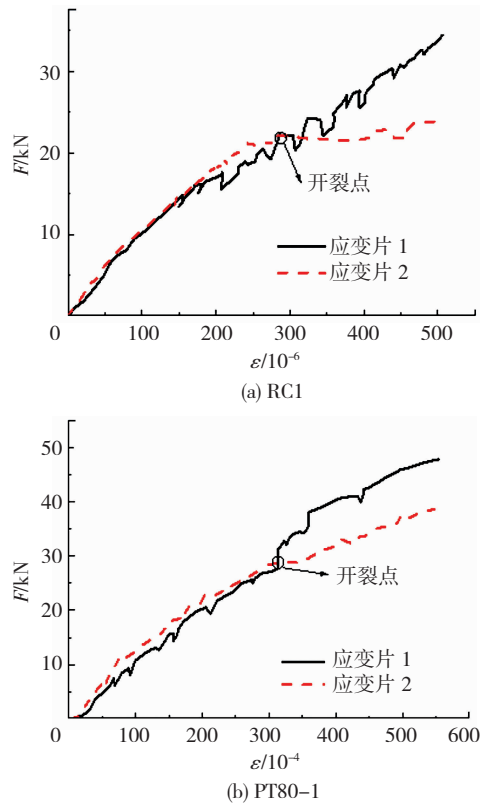


图 13 试件梁底荷载-应变曲线

Fig. 13 Strain-load curves of specimens at beam bottom

3.2 裂缝宽度及控制

ACI-318 规范在 2004 年之前对裂缝最大宽度进行直接控制,但后来发现因为裂缝的随机性,并不能有效计算混凝土最大裂缝宽度,因此现行的 ACI318-14 规范通过控制钢筋最大间距来控制试件的裂缝宽度,但究其本质,还是通过无滑移理论建立最大裂缝宽度表达式,从而控制最大裂缝宽度.经过简单推导,即可得出基于 ACI318-14 的混凝土最大裂缝计算公式:

$$\omega_{\max} = 2\beta \frac{\sigma_s}{E_s} \sqrt{(d_c)^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2},$$

式中: β 为考虑应变梯度的修正系数,计算时取 $\beta = 1.0 + 0.08d_c$, σ_s 为钢筋应力, E_s 为钢筋弹性模量,

d_c 为混凝土底面至底层钢筋形心的距离, s 为钢筋间距. 而欧洲规范 EUROCODE2 对受弯构件裂缝控制是通过裂缝间的平均间距与钢筋与混凝土间的平均应变差来实现的, 即

$$\omega_k = S_{r, \max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}),$$

式中: $S_{r, \max}$ 为裂缝间的平均间距, $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ 为钢筋与混凝土间的应变差, 二者均为与配筋率、保护层厚度、钢筋应变等因素相关的系数. 具体计算方法参考文献[14], 中国 GB 50010^[15] 规定的混凝土裂缝宽度可采用下列公式计算:

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \Psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9 - 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{eq}} \right),$$

式中: ψ 为纵筋应变不均匀系数, α_{cr} 为构件受力特征系数, d_{eq} 为纵向受拉钢筋的等效直径, ρ_{eq} 为试件纵向受拉钢筋配筋率.

根据上式可分别计算出基于美国 ACI 318、欧洲 EUROCODE2, 以及 GB 50010 等规范的 RC1 裂缝宽度达到一定值时的钢筋应力, 结果见表 4, 其中 ω_{\max} 为最大裂缝宽度, $\sigma_{s,A}$ 、 $\sigma_{s,E}$ 、 $\sigma_{s,G}$ 分别为按 ACI 318、

EUROCODE2 及 GB 50010 计算的受拉钢筋应力值. 从表 4 中看出, 与 ACI 318 和 EUROCODE2 相比, GB 50010 计算的钢筋应力更加保守, 若混凝土裂缝宽度限值为 0.2 mm 时, 则达到该限值时钢筋计算值尚未屈服, 造成钢筋浪费; 钢筋屈服时, 裂缝宽度又过大. 各试件加载过程的荷载裂缝宽度曲线见图 14, 图中 ω 为裂缝宽度, σ_c 为试件裂缝宽度达到 0.2 mm (GB 50010—2010 中二、三类环境下的混凝土裂缝宽度限值) 的钢筋计算应力.

表 4 试件在不同裂缝宽度下的钢筋应力

Tab. 4 Stress of rebar under different crack widths

ω_{\max}/mm	$\sigma_{s,A}/\text{MPa}$	$\sigma_{s,E}/\text{MPa}$	$\sigma_{s,G}/\text{MPa}$
0.1	204.5	224.2	186.5
0.2	360.2	378.6	348.2
0.3	474.6	483.1	455.7
0.4	622.4	635.7	577.2

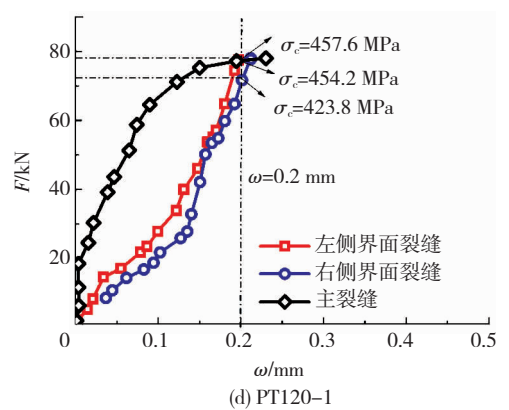
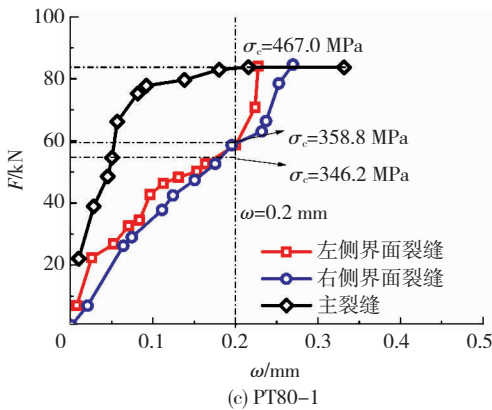
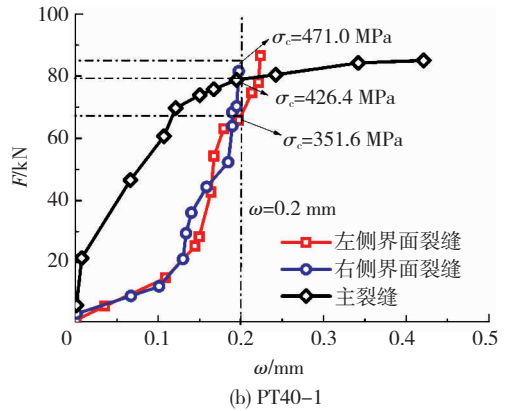
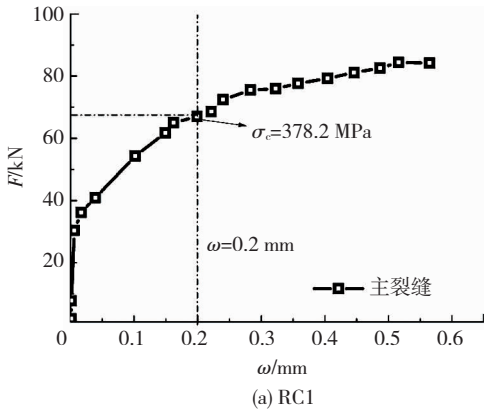


图 14 试件裂缝发展曲线

Fig. 14 Crack development curves of specimens

结果表明: 试件 RC1 在屈服 (钢筋应变为 2×10^{-3}) 时实际主裂缝宽度达到为 0.25 mm, 与计算值吻合较好. PC 梁跨中裂缝宽度在峰值荷载前始终控制在 0.2 mm 以下水平, 主裂缝形成后试件仍可承受荷载, 但裂缝已呈非稳态发展. 在试件承受荷载前

期两侧后浇裂缝较宽, 后期发展逐渐放缓, 而跨中裂缝早期发展十分缓慢, 直到试件达峰值荷载后才开始迅速开展. 主裂缝宽度达到 0.2 mm 时, 钢筋已进入屈服段, 有效利用了钢筋强度, 这反映出 ECC 材料具有优良的裂缝控制能力.

4 刚度退化及损伤演化

混凝土结构在受到外力作用下将不断产生损伤累计,进而导致结构开裂、变形、直至破坏.混凝土结构服役过程就是裂缝损伤不断累计过程,因此准确掌握结构的损伤累计过程对于结构性能评价有着十分重要的意义.下文将从刚度退化的角度论述试件的损伤演化过程.

4.1 试件刚度退化

本文采用下式计算试件的弯曲刚度:

$$B = \lambda \frac{Fl_0^2}{\Delta},$$

式中: B 为试件弯曲刚度, F 为荷载, Δ 为跨中挠度, l_0 为梁的计算跨度, λ 为挠度系数,与荷载形式和约束形式有关,采用图乘法可以得到本试验条件下的挠度系数 $\lambda = \frac{a}{48} \left(3 - \frac{4a}{l_0} \right)$, a 为加载点与支座中线间的距离.将本试验实测数据代入可算得试件的刚度退化曲线见图 15.由于 RC 梁采用整体浇筑工艺,没有早期开裂现象,因此比 PC 试件刚度下降缓慢.试件纯受弯区开裂后,PC 试件刚度下降趋缓,破坏时 RC 试件的残留刚度仍大于预制试件.

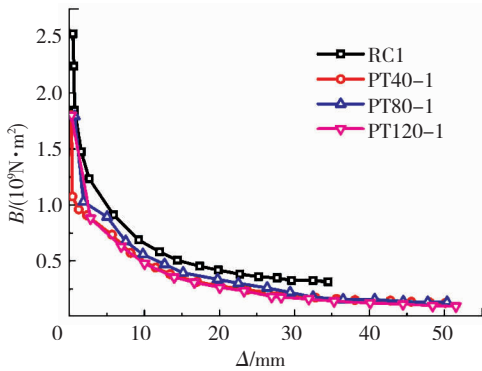


图 15 刚度退化曲线

Fig. 15 Stiffness degradation curves of specimens

4.2 试件损伤演化

本文以弯曲刚度的退化率来表征试件的损伤指数,即定义试件的损伤指数为

$$D = 1 - \frac{B_d}{B_0},$$

式中: D 为试件的损伤指数, B_0 和 B_d 分别为试件的初始弯曲刚度和损伤后弯曲刚度.

按上式计算得到的试件损伤指数曲线见图 16. RC 试件的损伤指数全程小于装配试件,且增长速度缓慢.预制试件加载初期损伤指数突然增大,但后期损伤发展较慢,在破坏阶段,预制试件的损伤指数大于 RC 试件,且 ECC 底板越厚,损伤指数增长越显著.在相同的大变形下,如试件 RC1 的跨中位移为

34.26 mm 时,其承载力下降至峰值荷载的 85%,此时试件已达到破坏,虽然损伤指数相对较低,若继续加载试件将完全破坏.相反,尽管预制试件损伤指数较高但仍有足够的承载力储备.

此外,以图 7 中的荷载-挠度曲线包围的面积表征试件耗能,表明在相同配筋率及连接方法条件下,PC 试件的耗能明显大于 RC 试件,且 ECC 底板越厚的试件耗能提升越显著.产生上述现象的原因在于:对于含 ECC 试件,在裂缝的产生与开展的同时,伴随内部乱序排列的 PVA 纤维与水泥基体摩擦及大量纤维的塑性变形过程,该过程既是损伤过程,也是能量耗散的过程.对于预制试件,损伤指数综合反映了材料破损和 ECC 材料耗能,判断构件是否破坏尚需结合其他性能参数进行综合分析.本研究的预制试件在损伤严重的情况下仍可继续加载,虽然刚度退化显著但承载力退化小,且耗能提高,因此适合应用于装配式结构的关键部位.

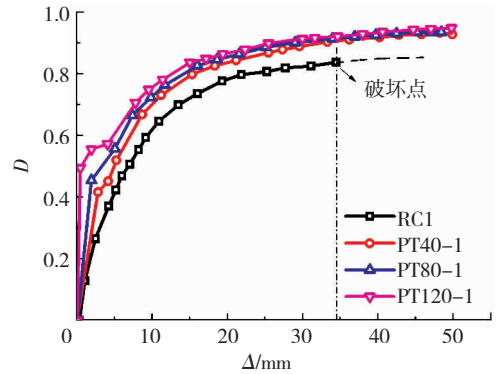


图 16 试件损伤演化曲线

Fig. 16 Damage evolution curves of specimens

5 结论

1) ECC 底板及后浇 ECC 节点可明显改善试件延性,使裂缝分布更加均匀,尤其在配筋率较高的试件中,改进效果尤为明显.预制试件的屈服荷载、屈服位移和极限位移较 RC 试件均有所提升.纵向钢筋采用套筒和套箍连接的形式均可起到较好的连接效果,可确保连接两侧的钢筋协同受力.

2) ECC 可与钢筋协调变形,但后浇 ECC 会对梁试件破坏形态产生影响,主要表现在结合面开裂较早,裂缝宽度在初期增长较明显,但在加载全过程该裂缝宽度均控制在 0.3 mm 内.在加载中后期,ECC 能有效抑制跨中主裂缝的产生与发展,试件跨中开裂荷载得到显著提升.所有预制构件在达到峰值荷载前的主裂缝宽度均满足正常使用极限状态下的要求.

3) 在加载初期预制试件刚度退化较快,但在后浇拼缝开裂后,刚度退化趋势放缓,且破坏时损伤指数较大.综合结果表明试件虽然刚度退化显著,但承

承载力退化较小,且耗能能力较高,适合应用于装配式结构.

参考文献

- [1] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 1
WANG Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2016.05.001
- [2] 刘程炜,曹万林,董宏英,等.半装配式再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(6):35
LIU Chengwei, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Test on seismic behavior of semi-assembled low-rise recycled concrete shear walls[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 35. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201609108
- [3] 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014 [S].北京:建筑工业出版社, 2014
Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014
- [4] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246)
- [5] MAYA L F, ZANUY C, ALBAJAR L, et al. Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fiber reinforced concrete [J]. Construction & Building Materials, 2013, 48(19): 173. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.002
- [6] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections [J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 1820. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.07.021
- [7] 梁兴文,康力,邓明科,等.塑性铰区采用纤维增强混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(2):63
LIANG Xingwen, KANG Li, DENG Mingke, et al. Experimental investigation on seismic behavior of columns with fiber-reinforced concrete in potential plastic region [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 63. DOI: 1000-6869(2014)02-0063-08
- [8] 梁兴文,郑雨,邓明科,等.塑性铰区采用纤维增强混凝土剪力墙的变形性能研究[J].工程力学, 2013, 30(3): 256
LIANG Xingwen, Zheng Yu, DENG Mingke, et al. An investigation of deformation behavior of the shear-wall with fiber-reinforced concrete in plastic hinge region [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.10.0720
- [9] 杨建,梁书亭,朱筱俊,等.装配式 RC/ECC 组合剪力墙空间结构模型设计方法研究[J].施工技术, 2016, 45(16): 9
YANG Jian, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun, et al. Research on the design method of a spatial model of RC/ECC combined precast shear wall [J]. Structure Construction Technology, 2016, 45(16): 9. DOI:10.7672/sjgs2016160009
- [10] 丁然,苟双科,樊健生,等.后浇 LSECC 装配整体式梁受弯性能试验研究[J].工程力学, 2018, 35(10): 56
DING Ran, GOU Shuangke, FAN Jiansheng, et al. Experimental research on mechanical performance of monolithic precast beams using cast-in-place low-shrinkage engineered cementitious composite [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 56. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0466
- [11] 张秀芳,徐世焯.采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(I):基本理论[J].土木工程学报, 2008, 41(12): 48
ZHANG Xiufang, XU Shilang. Improvement of the flexural and cracking behavior of RC beams using ultra-high toughness cementitious composites (I): Theoretical analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 48. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2008.12.008
- [12] 乔治,潘钻峰,梁坚凝,等. ECC/RC 组合梁受弯性能试验研究与分析[J].东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4):724
QIAO Zhi, PAN Zuanfeng, LEUNG C K Y, et al. Experimental study and analysis of flexural behavior of ECC /RC composite beams [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(4): 724. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.04.016
- [13] 米渊,潘金龙,周青山.钢筋与纤维增强水泥基复合材料粘结性能试验研究[J].建筑结构, 2016, 46(15): 69
MI Yuan, PAN Jinlong, ZHOU Qingshan. Experimental study on bond behavior between steel bars and patterned vertical alignment engineered cementitious composite [J]. Building Structure, 2016, 46(15): 69
- [14] 顾祥林.混凝土结构基本原理[M].上海:同济大学出版社, 2004:75
GU Xianglin. Basic principles for structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2004:75
- [15] 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 of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

(编辑 赵丽莹)