

文章编号:1673-2049(2018)06-0066-07

预应力 CFRP 加固高强混凝土梁试验

洪 雷, 太永伟

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:通过四点弯曲试验进行了预应力碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢筋混凝土梁与无筋混凝土梁受力过程、破坏形态、延性以及梁底 CFRP 应变的对比性研究,并对 $0, 0.15f_{\text{cfk}}, 0.30f_{\text{cfk}}$ (f_{cfk} 为抗拉强度标准值)3 种预应力等级下的加固梁受弯性能进行了研究。结果表明:试验梁破坏形态均为接近中部弯剪裂缝引起的界面破坏;当 CFRP 预应力由 0 提高至 $0.15f_{\text{cfk}}, 0.30f_{\text{cfk}}$ 时,混凝土加固梁与钢筋混凝土加固梁提升基本一致,无筋混凝土梁极限荷载分别提高了 8% 和 28%,钢筋混凝土梁极限荷载分别提高了 10% 和 25%;随着 CFRP 预应力等级提高,加固梁底部的剥离破坏逐渐由树脂胶层的破坏转变成胶层与混凝土界面的破坏,预应力 CFRP 加固钢筋混凝土梁比无筋混凝土梁裂缝数量明显增多,裂缝开展速度缓慢,裂缝均分布于加固梁两侧,无筋混凝土加固梁裂缝主要分布于一侧,且钢筋混凝土加固梁延性有明显提高;与 CFRP 预应力由 0 提升至 $0.15f_{\text{cfk}}$ 相比,CFRP 预应力等级由 $0.15f_{\text{cfk}}$ 提升至 $0.30f_{\text{cfk}}$ 时梁底 CFRP 跨中应变提升幅度较大,CFRP 利用率有了明显提升。

关键词:CFRP;预应力;高强混凝土;极限荷载;延性

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Experiment of Prestressed CFRP Reinforced High Strength Concrete Beams

HONG Lei, TAI Yong-wei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: The comparative studies of prestressed carbon fiber reinforced plastics (CFRP) reinforced concrete beams and non-reinforced concrete beams including mechanical process, failure pattern, ductility and beam bottom CFRP strain were carried out through the four-point bending test. The flexural performance of reinforced beam under three kinds of prestress levels of $0, 0.15f_{\text{cfk}}, 0.30f_{\text{cfk}}$ (f_{cfk} was CFRP tensile strength standard value) was studied. The results show that the failure modes of the test beams are all close to the interface failure caused by the middle bending shear crack. When the prestress level of CFRP is increased from 0 to $0.15f_{\text{cfk}}, 0.30f_{\text{cfk}}$, the uplift of reinforced concrete beam is basically same to reinforced concrete beam, the ultimate load of unreinforced concrete beam is increased by 8% and 28% respectively, and the ultimate load of reinforced concrete beam is increased by 10% and 25% respectively. With the increase of CFRP prestress level, the stripping failure of strengthening beam bottom is changed from failure of resin lay into interface failure of glue layer and concrete. Compared to the plain

收稿日期:2017-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51378089);海岸和近海工程国家重点实验室基金项目(SII4-3-2)

作者简介:洪 雷(1964-),男,黑龙江牡丹江人,副教授,工学博士,E-mail:honglei_a@163.com。

concrete beam, the number of cracks of prestressed CFRP reinforced concrete beams increases obviously, crack propagation speed is slow, the cracks are uniform distributed in reinforcement beam on both sides, however the cracks of plain concrete beam are mainly distributed in a side, and ductility of reinforced concrete beam reinforcement has increased significantly. Compared with the CFRP prestress level increasing from 0 to $0.15f_{\text{cfk}}$, when the CFRP prestress level increasing from $0.15f_{\text{cfk}}$ to $0.30f_{\text{cfk}}$, the mid-span strain of CFRP beam bottom of is greatly improved, and the utilization rate of CFRP strengthened by prestressed CFRP is improved too.

Key words: CFRP; prestress; high strength concrete; ultimate load; ductility

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等优点,因此被广泛应用在建筑物的加固中。CFRP 的加固方法是将 CFRP 黏结在混凝土表面上,进而提高被加固构件的承载力、变形和延性等性能,但由于 CFRP 有着极高的抗拉强度(超过 3 000 MPa),在构件破坏后尚不能完全发挥其抗拉性能,因此采用预应力 CFRP 加固构件会更好发挥 CFRP 的高抗拉特性,从而避免黏结界面的应力滞后效应等现象^[1-13]。

国内外学者对碳纤维布加固混凝土梁进行了大量的试验研究^[14-21]。尚守平等^[19]根据研究预应力碳纤维布加固混凝土梁构件的性能,对预应力碳纤维布加固混凝土梁的受弯构件和非预应力碳纤维布加固混凝土梁的受弯构件的荷载、抗弯刚度和工作性能进行分析,结果表明预应力碳纤维布极大地提高了梁的工作性能。刘立新等^[20]对预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁进行了研究,结果表明预应力碳纤维布加固梁其抗裂性增强,碳纤维布强度的利用率都得以提高。本文采用不同预应力等级的 CFRP 对无筋混凝土梁和钢筋混凝土梁进行了加固,并对加固后的梁构件性能进行了对比试验研究。

1 试验概述

1.1 试验材料

试验中混凝土的强度等级为 C60,其中水泥采用 PⅡ. 52. 5R 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰,粗骨料选用粒径 5~10 mm 连续级配的碎石,减水剂为聚羧酸高效减水剂,标准养护 28 d 后混凝土实测强度为 69. 84 MPa,配合比如表 1 所示。CFRP 布采用日本东丽 UT70-30 单向编织碳纤维布;底涂树脂和浸渍树脂采用 JGN 型碳纤维建筑结构胶,甲、乙两组分按照 3 : 1 的比例配制。常温下 CFRP 力学性能见表 2。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix Proportion of Concrete $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

强度等级	水	水泥	粉煤灰	砂	石	减水剂
C60	147	396	62	641	1 246	9. 16

表 2 CFRP 力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of CFRP

计算厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限延伸率/%
0. 167	3 552	231	1. 68

1.2 试件制作

采用钢筋混凝土和混凝土矩形截面简支梁,截面尺寸为 80 mm×120 mm,总长为 900 mm,净跨为 800 mm。钢筋混凝土梁底部纵向钢筋为 2 Φ 8,架立筋为 2 Φ 6,箍筋为 Φ 6@60,跨中箍筋间距为 100 mm。除底部受拉钢筋采用 HRB400,其余钢筋均采用 HPB300,如图 1 所示,其中 P 为荷载。

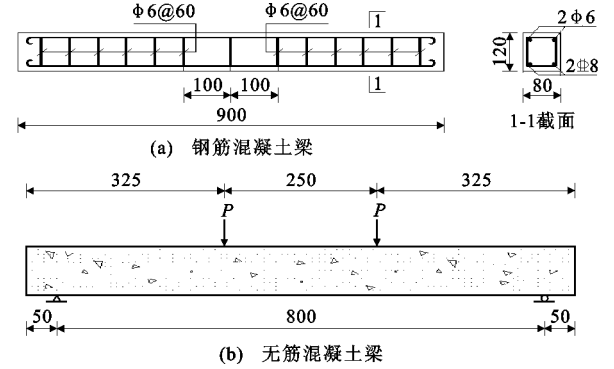


图 1 试验梁(单位:mm)

Fig. 1 Test Beams (Unit:mm)

预应力加载装置采用自行设计的持载器,由三部分构成^[16]:第 1 部分为试件的上连接装置,主要由球铰、荷载传感器、槽型铁、插销四部分组成;第 2 部分为直接作用在试件上的持载装置;第 3 部分为试件与试验台进行连接的底座装置,见图 2。

试验梁在标准养护 28 d 后,用角磨机将粘贴 CFRP 的位置打磨平整,磨去表面浆体,露出粗骨料。在梁两侧粘贴 CFRP 布作为锚固端,布宽为 27 束(约为 70 mm),为防止预应力张拉时剥离,在 2



图 2 预应力加载装置

Fig. 2 Prestressed Loading Device

个锚固端处再贴 1 层 CFRP 布,粘贴示意图见图 3。通过加载装置施加预应力,调整至相应等级的预应力值后将 CFRP 粘贴在梁的底面,将梁同持载器在室温环境下静置 7 d,待结构胶完全固化后剪断 CFRP 布,将持载器拆下。为防止 CFRP 在高预应力下放张时剥离,在梁端部设置了 70 mm 宽的 U 形箍,加固梁示意图见图 4。

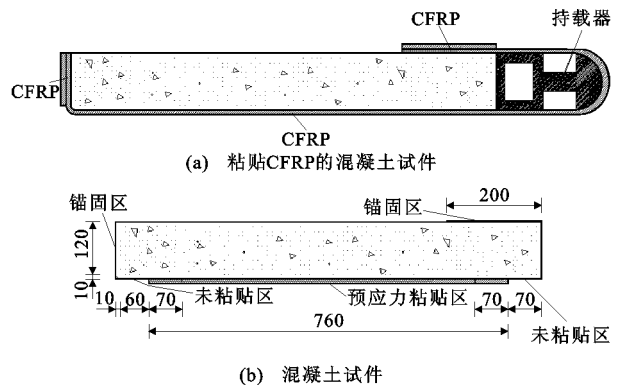


图 3 CFRP 粘贴区域(单位:mm)

Fig. 3 Paste Areas of CFRP (Unit:mm)

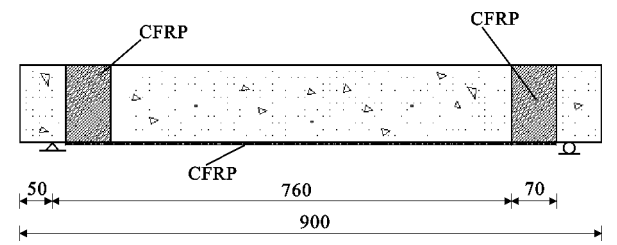


图 4 加固梁示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic Diagram of Reinforced Beams (Unit:mm)

1.3 试验方法

根据不同的初始预应力等级,每组设置 P01(非

预应力)对比件和 P02($0.15f_{cfk}$),P03($0.30f_{cfk}$)2 个等级的预应力试件,其中 f_{cfk} 为碳纤维片材的抗拉强度标准值。根据梁种类和 CFRP 预应力等级对试件进行编号,K 表示梁种类,K1 为钢筋混凝土梁,K2 为无筋混凝土梁,P 表示 CFRP 预应力,共 6 组,每组 3 个试件试验结果取平均值。

采用 100 t 电液伺服试验机进行四点加载,加载采用位移加载方式,加载过程中通过德国制造的 IMC 数据采集装置进行数据采集,加载速率为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,持续施加荷载,直至试验梁破坏,停止加载,试验装置见图 5。试验主要采集以下数据:①通过 100 kN 荷载传感器测量试件所承受的荷载;②用线性可变差动变压器(LVDT)测量试件的跨中挠度;③进行应变测量,包括梁跨中受拉钢筋的应变,以及梁底面 CFRP 的应变,具体粘贴位置如图 6 所示。

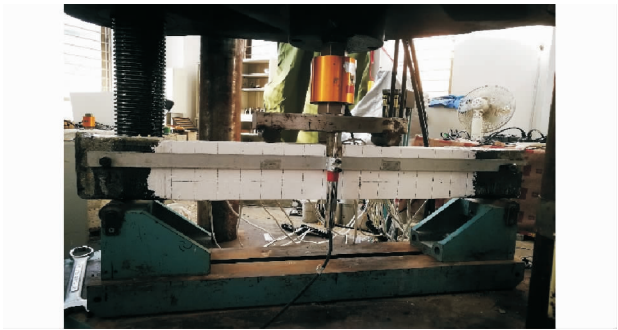


图 5 试验装置

Fig. 5 Test Setup

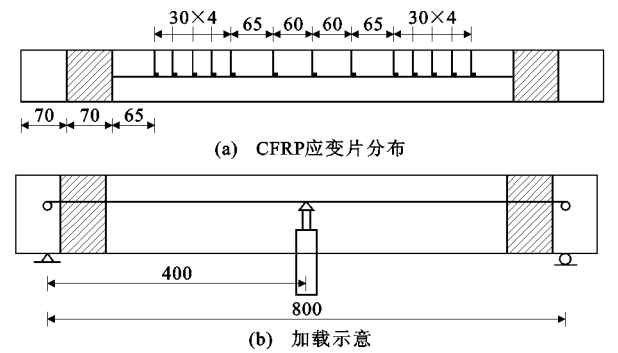


图 6 数据采集位置(单位:mm)

Fig. 6 Positions of Data Acquisition (Unit:mm)

2 结果分析

2.1 荷载及挠度分析

表 3 列出了各组试验梁的试验结果。由表 3 可见,相比于 K1P01 试验梁,CFRP 施加预应力的加固梁开裂荷载、极限荷载均有了明显的提高;K1P03 试验梁相比于 K1P02 试验梁其开裂荷载的增幅逐

表 3 各试验梁的试验结果

Tab.3 Test Results of Test Beams

试件编号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	极限挠度/mm	$F_{0.2}$ /kN
K1P01	13.2	52.9	6.93	45.4
K1P02	16.9	58.5	8.56	49.9
K1P03	18.3	66.0	12.61	56.1
K2P01	12.6	17.3	4.72	13.7
K2P02	15.1	18.6	4.33	16.9
K2P03	16.4	22.3	3.79	18.9

注： $F_{0.2}$ 为最大裂缝宽度 0.2 mm 时的荷载。

渐趋于平稳，而极限荷载有更为明显的提高趋势。

由表 2 还可以看出：钢筋混凝土梁试验中，随着 CFRP 预应力从 0 提高到 $0.15f_{cfk}$ ， $0.30f_{cfk}$ ，其开裂荷载分别提高了 28%，38%，极限荷载分别提高了 10%，25%；无筋混凝土梁试验中，开裂荷载分别提高了 19%，30%，极限荷载分别提高了 8%，28%。表明预应力 CFRP 加固无筋梁与有筋梁的各项荷载提升幅度基本一致，加固效果大致相同。

与 K1P01 梁对比可以看出，CFRP 预应力为 $0.15f_{cfk}$ ， $0.30f_{cfk}$ 的钢筋混凝土梁在最大裂缝为 0.2 mm 时的荷载相对于预应力为 0 的钢筋混凝土梁分别提高了 10%，24%，无筋混凝土梁在此荷载时分别提高了 23%，40%。表明预应力 CFRP 加固无筋混凝土梁抑制裂缝效果更为明显。

图 7 为钢筋混凝土梁及无筋混凝土梁的荷载-挠度曲线。有筋及无筋混凝土梁的荷载-挠度曲线可大致分为 3 个阶段：第 1 阶段为试验梁的弹性上升阶段，基本呈线性变化；第 2 阶段为试验梁开裂后阶段，开裂界面混凝土拉应力迅速释放，导致混凝土与 CFRP 黏结界面应力不断增加，其间曲线非线性增长缓慢，随着荷载震荡的上升，裂缝不断地产生与开展，直至达到极限荷载，此阶段为剥离段，阶段的长度代表着结构的延性，剥离段越长，其延性越好；第 3 阶段为极限荷载后的极速下降段，主裂缝迅速开展，CFRP 从主裂缝不断剥离，直至沿一侧完全剥离，试验梁承载力丧失。

加固钢筋混凝土梁与无筋混凝土梁明显区别段为第 2 阶段。进入混凝土开裂后，无筋混凝土梁存在明显的下降段，但由于 CFRP 迅速发挥作用，梁承载力继续提升，随着预应力等级的提高，其承载能力提高幅度逐渐增大，直至 CFRP 与混凝土界面剥离，达到其极限承载力；钢筋混凝土梁因钢筋和 CFRP 的存在，在开裂后没有明显的下降段，荷载有微小幅度的震荡上升，直至 CFRP 与混凝土界面剥离，达到极限荷载。

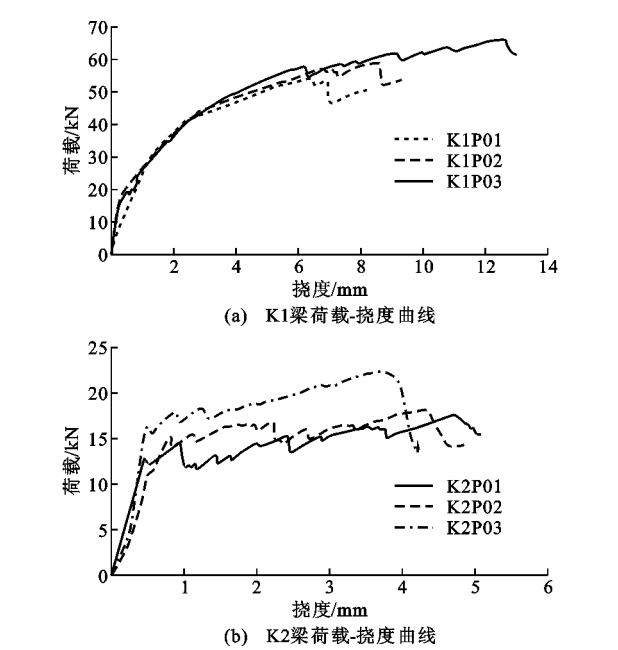


图 7 不同等级预应力 CFRP 加固高强混凝土梁的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection Curves of High Strength Concrete Beams with Different Levels of Prestressed CFRP

达到梁极限承载力后，无筋混凝土梁承载力迅速下降，并随着预应力 CFRP 等级的提高，下降段愈加明显；加固钢筋混凝土梁随着预应力 CFRP 等级的提高，其下降幅度较小，且其延性有了显著的提高，在预应力 CFRP 由 $0.15f_{cfk}$ 提高至 $0.30f_{cfk}$ ，剥离段增长明显，表明其延性有大幅提高。

2.2 破坏形态分析

2.2.1 无筋混凝土梁破坏形态分析

图 8(a)，(b) 分别为 $0.15f_{cfk}$ ， $0.30f_{cfk}$ 预应力 CFRP 加固的无筋混凝土梁破坏形态，其破坏形态均为中部弯剪裂缝引起的界面剥离破坏。无筋混凝土梁在加载过程中裂缝主要分布在试验梁的一侧，且裂缝数量少，主要为弯剪裂缝。随着 CFRP 预应力等级的提高，其裂缝数量明显减少。

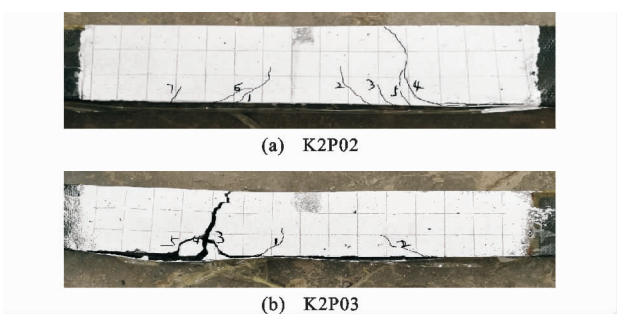


图 8 混凝土梁破坏形态

Fig. 8 Failure Modes of Concrete Beams

加载初期在弯剪段出现裂缝,裂缝不断开展,直至荷载达到一定值时,CFRP 与混凝土界面迅速剥离,致使梁承载能力丧失,梁顶混凝土并未压碎。剥离后 CFRP 上黏着少量的混凝土颗粒,但随着预应力等级的提高,粘贴的混凝土颗粒越来越多,甚至伴随着保护层的剥落。这表明随着预应力等级的提高,其界面破坏由胶层的破坏逐步转变为胶层与混凝土的破坏。

2.2.2 钢筋混凝土梁破坏形态分析

图 9(a),(b)分别为 $0.15f_{cfk}$, $0.30f_{cfk}$ 预应力 CFRP 加固钢筋混凝土梁破坏形态,图 9(c),(d)分别为 $0.15f_{cfk}$, $0.30f_{cfk}$ 预应力 CFRP 加固混凝土梁梁底破坏形态。钢筋混凝土梁裂缝明显增多,这是由于钢筋的存在极大地增加了梁的强度与延性,使其承载力有了显著的提高,导致梁在不断加载中出现更多的裂缝。梁的破坏形态均为中部弯剪裂缝引起的界面剥离破坏,裂缝较均匀地分布在梁的两侧。随着荷载的增加,弯剪段的主裂缝不断开展,当达到一定水平时,CFRP 与混凝土界面剥离,伴随着上部混凝土被压碎,试验梁达到其极限承载能力。

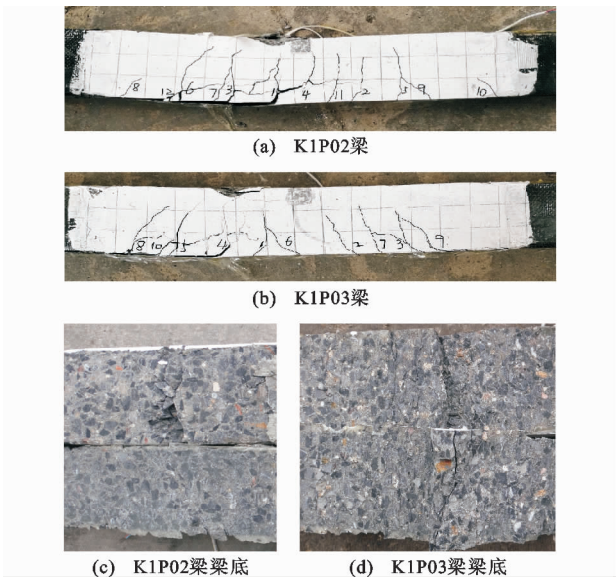


图 9 钢筋混凝土梁破坏形态

Fig. 9 Failure Modes of Reinforced Concrete Beams

对比 $0.15f_{cfk}$, $0.30f_{cfk}$ 预应力梁破坏形态可以发现, $0.30f_{cfk}$ 预应力梁裂缝明显减少,剥离后的 CFRP 上黏结下更多的混凝土,不仅有表层的泥浆,同时上面附着部分粗骨料,其界面破坏为胶层与混凝土的破坏。表明高预应力 CFRP 下可延缓梁裂缝的开展与发展,同时对 CFRP 与混凝土黏结界面有着更好的黏结效应。

2.3 荷载-应变分析

图 10 为钢筋混凝土梁以及无筋混凝土梁的荷载-应变曲线。钢筋混凝土梁和无筋混凝土梁的荷载-跨中应变曲线大致可分为 3 个阶段:第 1 阶段为弹性阶段,曲线基本呈线性变化,CFRP 跨中应变随着荷载增长而增长;第 2 阶段为混凝土开裂后 CFRP 的剥离阶段,由于混凝土开裂后混凝土界面的拉应力迅速释放导致 CFRP 应变的不断增长,其中曲线的波折点为混凝土开裂或者 CFRP 与混凝土界面开始产生剥离;第 3 阶段为达到极限荷载,试验梁破坏。由于预应力 CFRP 的存在,有筋梁的延性比无筋梁有着显著提高,CFRP 的利用率有了明显提升。

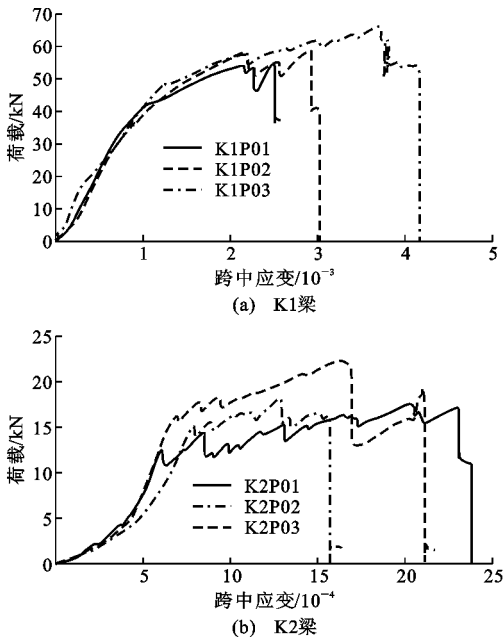


图 10 不同等级预应力 CFRP 加固高强混凝土梁的荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-strain Curves of High Strength Concrete Beams with Different Levels of Prestressed CFRP

相比于 CFRP 加固试件,预应力 CFRP 加固试件开裂荷载和 CFRP 极限应变明显增大,随着 CFRP 预应力等级的提高,增大幅度更为明显。由图 10 可见,相比于 K2P02 和 K2P01 试件, K2P03 试件极限荷载和极限 CFRP 应变大幅增大。由此可见,预应力 CFRP 加固试件的承载能力明显高于普通 CFRP 加固试件,同时预应力 CFRP 的存在明显提高了 CFRP 利用率,合理利用了 CFRP 高强特性,提高了试件的工作性能。与 CFRP 预应力由 0 提升至 $0.15f_{cfk}$ 相比,CFRP 预应力由 $0.15f_{cfk}$ 提升至 $0.30f_{cfk}$,梁底 CFRP 跨中应变提升幅度明显。

3 结 语

(1)预应力CFRP加固钢筋混凝土梁与无筋混凝土梁的破坏为中部弯剪裂缝引起的界面破坏,随着CFRP预应力等级的提高,其破坏形态由树脂胶层的破坏变成胶层与混凝土界面的破坏。

(2)预应力CFRP显著提高了加固梁的开裂荷载和极限荷载。CFRP预应力由0提高到 $0.15f_{\text{cfk}}$, $0.30f_{\text{cfk}}$ 时,无筋混凝土梁极限荷载分别提高了8%和28%,开裂荷载分别提高了19%和30%;2个有筋混凝土梁极限荷载分别提高了10%和25%,开裂荷载提高了28%和38%。

(3)预应力CFRP加固钢筋混凝土梁相比无筋混凝土梁其裂缝数量明显增多,裂缝开展速率缓慢,且钢筋混凝土梁的延性有了明显增强。

参考文献:

References:

- [1] ASLAM M, SHAFIGH P, JUMAAT M Z, et al. Strengthening of RC Beams Using Prestressed Fiber Reinforced Polymers — A Review[J]. Construction and Building Materials, 2015, 82: 235-256.
- [2] 洪雷, 马腾龙, 王苏岩. 湿热环境下预应力CFRP加固高强混凝土的耐久性[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 25-31.
HONG Lei, MA Teng-long, WANG Su-yan. Durability of High Strength Concrete Strengthened with Prestressed CFRP Under Wet-thermal Environments [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 25-31.
- [3] HAWILEH R A, RASHEED H A, ABDALLA J A, et al. Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid Fiber Reinforced Polymer Systems[J]. Materials & Design, 2014, 53: 972-982.
- [4] HUANG L, YAN B, YAN L, et al. Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Natural Flax FRP Plates[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 91: 569-578.
- [5] 庄芸. 预应力碳纤维布加固二次受力梁抗弯试验研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 65-69.
ZHUANG Yun. Experimental Research on Flexural Performance of Reinforced Concrete Twice Loading Beams Strengthened with Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2008, 30(2): 65-69.
- [6] 程东辉, 杨燕红. 预应力CFRP布加固荷载混凝土柱轴心受压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 34-40.
CHENG Dong-hui, YANG Yan-hong. Research on Axial Compressive Properties of Preloaded Concrete Columns Strengthened with Prestressed CFRP Sheets[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(4): 34-40.
- [7] BARROS J A O, FORTES A S. Flexural Strengthening of Concrete Beams with CFRP Laminates Bonded into Slits[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27: 471-480.
- [8] 洪雷, 江海鑫, 王苏岩. 冻融循环下预应力CFRP加固高强混凝土耐久性[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 227-232.
HONG Lei, JIANG Hai-xin, WANG Su-yan. Durability of High Strength Concrete Strengthened with Prestressed CFRP Under Freeze-thaw Cycles [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2): 227-232.
- [9] 刘波. 预应力碳纤维片材加固混凝土梁胶层粘结厚度的影响试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
LIU Bo. Experimental Study on the Impact of Thickness of the Adhesive Layer of Prestressed Carbon Fiber Sheet Reinforced Concrete Beam[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [10] 陈忠范, 徐明. 碳纤维片材抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 47-51.
CHEN Zhong-fan, XU Ming. Experimental Research on RC Beams Reinforced with CFRP[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(4): 47-51.
- [11] BAE S W, TANN B D, BELARBI A. Size Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets[C]//CICE. Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012). Rome: CICE, 2012: 1-8.
- [12] 张剑, 江雷, 殷王华. 预应力CFRP/GFRP纤维加固梁的延性性能研究[J]. 新技术新工艺, 2016(4): 34-35.
ZHANG Jian, JIANG Lei, YIN Wang-hua. Ductility Performance of Beams Strengthened with Prestressed CFRP/GFRP Sheets[J]. New Technology & New Process, 2016(4): 34-35.
- [13] 尚守平, 张宝静, 吕新飞. 预应力CFRP板加固钢筋

- 混凝土梁间接刚度试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 74-81.
- SHANG Shou-ping, ZHANG Bao-jing, LU Xin-fei. Experiment on Indirect Stiffness of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Plate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11): 74-81.
- [14] GAO P, GU X L, MOSALLAM A S. Flexural Behavior of Preloaded Reinforced Concrete Beams Strengthened by Prestressed CFRP Laminates[J]. Composite Structures, 2016, 157: 33-50.
- [15] 彭 晖, 尚守平, 金勇俊, 等. 预应力碳纤维板加固受弯构件的试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 142-151.
- PENG Hui, SHANG Shou-ping, JIN Yong-jun, et al. Experimental Study of Reinforced Concrete Beam with Prestressed CFRP Plate[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 142-151.
- [16] CROMWELL J R, HARRIES K A, SHAHROOZ B M. Environmental Durability of Externally Bonded FRP Materials Intended for Repair of Concrete Structures[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2528-2539.
- [17] HONG L, DUO R M, WANG S Y, et al. Influence of Freeze-thaw Cycles on Bonded Interface Performance Between CFRP and High Strength Concrete[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638-640: 1516-1520.
- [18] SEN R. Developments in the Durability of FRP-concrete Bond[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 112-125.
- [19] 尚守平, 彭 晖, 童 桦, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30.
- SHANG Shou-ping, PENG Hui, TONG Hua, et al. Study of Strengthening Reinforced Concrete Beam Using Prestressed Carbon Fiber Sheet[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 24-30.
- [20] 刘立新, 谢丽丽, 桑大勇. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(增): 298-300.
- LIU Li-xin, XIE Li-li, SANG Da-yong. Experimental Study on Flexural Properties of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Bonded by Structural Adhesives[J]. Building Structure, 2007, 37(S): 298-300.
- [21] 王苏岩. FRP 布加固试验用持续荷载加载器及方法: 中国, 200810010846. 8[P]. 2010-09-08.
- WANG Su-yan. Continuous Loader and Method for FRP Strengthening Test: China, 200810010846. 8 [P]. 2010-09-08.