

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.03.008

预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能

王海涛¹, 马明磊^{2,3}, 许国文^{2,3}, 陈敏生¹, 唐 朝¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122;

3. 上海碳纤维复合材料土木工程应用工程技术研究中心, 上海 200122)

摘要: 为了探索碳纤维复材(CFRP)绞线在混凝土结构中的应用, 采用 CFRP 绞线作为预应力筋, 开展了预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能试验研究。试验结果表明: 平截面假定适用于混合配筋的混凝土梁; 配置预应力 CFRP 绞线可以显著提高混凝土梁的抗弯承载力, 相比于普通钢筋混凝土梁, 混合配筋混凝土梁的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别提高了 74% ~ 146%、27% ~ 48% 和 29% ~ 50%, 但混合配筋混凝土梁的延性明显降低; 在混凝土压碎失效模式下, 预应力水平和预应力 CFRP 绞线数量对延性影响并不明显; GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》中预应力纤维复材(FRP)筋混凝土梁的抗弯承载力计算公式可以应用于预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯承载力计算。

关键词: CFRP 绞线; 混凝土梁; 混合配筋; 预应力; 抗弯性能

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)03-0058-06

Flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars

WANG Haitao¹, MA Minglei^{2,3}, XU Guowen^{2,3}, CHEN Minsheng¹, TANG Chao¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Shanghai 200122, China;

3. Research Center of Shanghai Carbon Fiber Composite Application Technology
in Civil Engineering, Shanghai 200122, China)

Abstract: To explore the application of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strands in concrete structures, the CFRP strands were used as the prestressed reinforcements in this study. The experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars was conducted. The test results indicate that the plane cross-section assumption is suitable for the hybrid reinforced concrete beams. Application of the prestressed CFRP strands can significantly increase the flexural capacity of concrete beams. The cracking, yielding, and ultimate loads of the hybrid reinforced beams are increased by 74%-146%, 27%-48% and 29%-50%, compared with ordinary reinforced concrete beams. However, the ductility of the hybrid reinforced beams is obviously reduced, while the prestress level and number of prestressed CFRP strands have an insignificantly effect on the ductility under the failure mode of concrete compressive crushing. The calculation equations of the flexural capacity for prestressed fiber reinforced polymer (FRP) bar reinforced concrete beams in GB 50608-2020 *Technical Standard for Fiber Reinforced Polymer in Construction* can be used for calculating the flexural capacity of the concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars.

Key words: CFRP strand; concrete beam; hybrid reinforcement; prestress; flexural behavior

与普通混凝土结构相似, 在长期服役过程中, 预应力混凝土结构中的预应力钢筋同样遭受不同程度的腐蚀影响^[1-2]。预应力钢筋在较高应力作用下产生的微裂纹与氯化物点蚀存在耦合作用, 引起的损伤比普通钢筋更

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378233); 中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2022-Z-8); 上海市科技计划项目(20DZ2253000)

作者简介: 王海涛(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构高效加固技术及新材料与新型结构研究。E-mail: cewht@hhu.edu.cn

通信作者: 许国文(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事新材料在土木工程中的应用研究。E-mail: xuguow@163.com

引用本文: 王海涛, 马明磊, 许国文, 等. 预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 58-63.

WANG Haitao, MA Minglei, XU Guowen, et al. Flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(3): 58-63.

严重,甚至会导致预应力钢筋的突然脆性断裂^[3-5],对预应力结构的服役安全带来严重威胁。为解决预应力钢筋在高腐蚀地区应用时可能面临的腐蚀问题,用高耐久的新型材料替代传统的预应力钢筋是一种可行方法。采用纤维复材(FRP)筋替代预应力钢筋是解决预应力混凝土结构耐久性问题的最有效方法之一^[6]。

与普通钢材相比,FRP 筋具有高强、轻质、耐腐蚀性好等优点,已在工程结构中得到大量应用^[7-11]。将 FRP 筋作为混凝土结构中预应力筋的研究始于 1974 年^[6],20 世纪 90 年代后国内外对预应力 FRP 筋增强混凝土结构开展了大量研究^[12-21];Yonekura 等^[12]发现,预应力碳纤维复材(CFRP)筋增强混凝土梁的力学性能和预应力钢筋增强混凝土梁相似;Abdelrahman 等^[13]的试验结果表明,当预应力 CFRP 筋增强混凝土梁发生混凝土压碎时,其极限变形和预应力钢筋混凝土梁接近,但当发生 CFRP 筋拉断失效时,其极限变形低于对应的预应力钢筋混凝土梁;薛伟辰等^[6]的试验结果表明,当配置 2 根预应力 CFRP 筋时,随着预应力度从 0.5 升高到 0.7,试件的屈服荷载和极限荷载分别下降 46.8% 和 14.7%,而跨中极限位移增加 39.5%;Heo 等^[18]通过试验研究了预应力筋配筋率、预应力大小、荷载类型和截面形状等参数对无黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁弯曲性能的影响,发现无黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁的延性好于对应的有黏结梁,预应力 CFRP 筋混凝土梁的破坏形式受荷载类型以及预应力配筋率的影响;彭飞^[20]建立了两种混合配筋(预应力 FRP 筋和非预应力钢筋、预应力和非预应力 FRP 筋)的预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯承载力计算方法,并开展了可靠度分析;Wu 等^[21]通过研究预应力 CFRP 筋对轻集料混凝土梁抗弯性能的影响,发现施加预应力使极限弯矩平均增加了 50% 以上,开裂弯矩提升 101%。近年来,一些学者也开展了预应力 FRP 混凝土梁的长期抗弯性能和耐久性方面的研究^[22-23],这些研究验证了预应力 FRP 筋在预应力混凝土结构中应用的可能性。

预应力 FRP 绞线是通过将多根 FRP 筋扭绞在一起形成的一种新型预应力筋材,同时多根 FRP 筋在单个锚具中一起锚固,共同张拉。虽然目前文献中已经有大量关于预应力 FRP 筋混凝土梁的抗弯性能研究,但对预应力 FRP 绞线混凝土梁的抗弯性能研究仍非常少。为了探索 FRP 绞线在预应力混凝土结构上的应用,本文采用 CFRP 绞线作为预应力筋,开展预应力 CFRP 绞线和钢筋混合增强混凝土梁抗弯性能的试验研究,探讨预应力水平和 CFRP 绞线数量对抗弯性能的影响,并基于 GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》中的公式进行抗弯承载力预测,以期能为 CFRP 绞线在预应力混凝土梁中的应用提供参考。

1 试验方法

1.1 试件设计

试件为混凝土 T 形截面梁,采用 C40 商品混凝土浇筑。将 5 个立方体试块在室外自然环境养护 28 d,实测的混凝土立方体抗压强度平均值为 32.6 MPa。试件的总长为 4 200 mm,T 形截面高度为 400 mm,腹板宽度为 250 mm,翼缘高度和宽度分别为 75 mm 和 400 mm,混凝土保护层厚度为 20 mm。钢筋均为 HRB400 级,在底部配置 3 根直径为 22 mm 的受拉钢筋(实测屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为 467 MPa、646 MPa 和 190 GPa);在顶部配置 4 根直径为 8 mm 的受压钢筋(实测屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为 602 MPa、761 MPa 和 200 GPa);箍筋的直径为 10 mm(实测的屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别为 603 MPa、677 MPa 和 200 GPa),在纯弯段和弯剪段的间距分别为 150 mm 和 80 mm。试件的配筋如图 1 所示。对于混合配筋梁,采用后张法张拉预应力 CFRP 绞线,试件制作时预留公称直径为 68 mm 的波纹管道,待预应力 CFRP 绞线张拉完成后,在 CFRP 绞线和波纹管的孔道间进行灌浆。

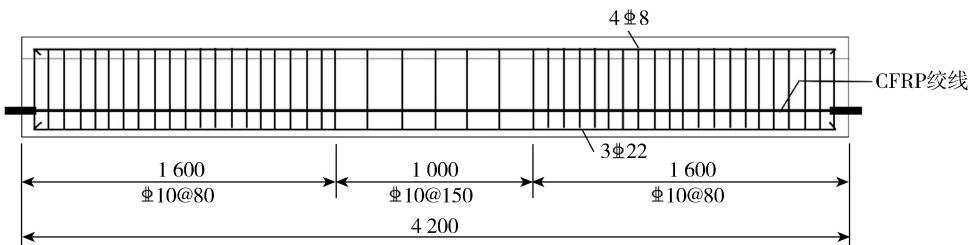


图 1 试件混合配筋示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of specimen with hybrid reinforcement (unit: mm)

试验共设计 4 根试件,包括 1 根仅配置普通钢筋试件(B0)和 3 根混合配筋试件(表 1),主要分析 CFRP

绞线数量和预应力水平对抗弯性能的影响,其中预应力水平为试件的设计预应力与 CFRP 绞线抗拉强度的比值。CFRP 绞线由中复碳芯电缆科技有限公司生产,由 7 根直径 5 mm 的 CFRP 筋组成,公称直径为 15.2 mm,抗拉强度为 2500 MPa,弹性模量为 170 GPa。采用的 CFRP 绞线锚具为黏接型锚具,由柳州欧维姆机械股份有限公司研发,在工厂完成 CFRP 绞线的锚固后,运至实验室进行 CFRP 绞线的预应力张拉。张拉控制应力取为设计预应力的 1.05 倍,分 5 级完成,每级施加张拉控制应力的 20%,在完成每一级张拉后,持续荷载 2 min,随后继续张拉至下一级应力。

1.2 加载及测量方案

采用量程为 1000 kN 的万能试验机对试件进行四点弯曲加载,试件的净跨为 4 000 mm,纯弯段长度为 1 000 mm。加载采用分级加载制度和位移控制模式,受拉钢筋屈服以前的加载速率为 0.5 mm/min,在开裂前每级加载 10 kN,开裂后每级加载 20 kN;钢筋屈服后加载速率增长至 0.8 mm/min,加载至试件失效。在跨中、加载点以及支座位置布置 5 个量程为 100 mm 的位移计,测量试件的挠度变化。在跨中的混凝土表面、受拉钢筋表面以及 CFRP 绞线表面分别黏贴应变片,其中在梁跨中沿截面高度以 80 mm 的间隔布置混凝土应变片,用来验证混合配筋梁截面是否满足平截面假定。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及失效模式

所有试件均发生混凝土受压破坏,未发生 CFRP 绞线拉断或锚具滑移失效,典型试件失效现象如图 2 所示。所有试件的试验现象相近,表现出 3 个受力阶段:加载开始时,受拉区混凝土并未开裂,荷载随位移基本线性增长;试件出现裂缝后,进入第二阶段,抗弯刚度明显下降,弯曲裂缝在纯弯段不断开展,随后弯剪段也出现了斜裂缝;当受拉钢筋开始屈服后,试件进入第三阶段,此阶段弯曲裂缝的数量基本不再增加而既有裂缝宽度快速增加,荷载-位移曲线的斜率大幅降低,最终纯弯段顶部的混凝土被压碎,试件失效。试验发现,相比于普通钢筋混凝土梁 B0,混合配筋试件的最大挠度明显降低。

2.2 平截面假定验证

图 3 中混凝土应变值均为加载引起的应变,不包括初始张拉应变。由图 3 可知,跨中截面上混凝土的平均应变沿截面高度基本呈线性变化,说明平截面假定也适用于预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁。

表 1 试件的设计参数

Table 1 Design details of specimens			
试件	绞线数量	预应力水平/%	预应力/MPa
B1	1	45	1 125
B2a	2	45	1 125
B2b	2	30	750

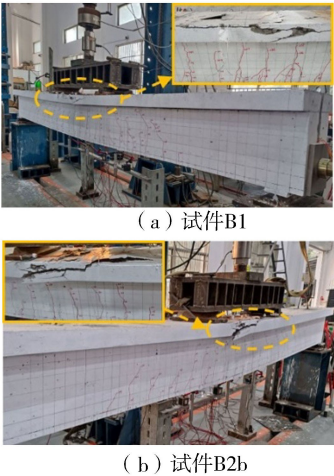


图 2 典型试件失效现象
Fig.2 Failure phenomenon of typical specimens

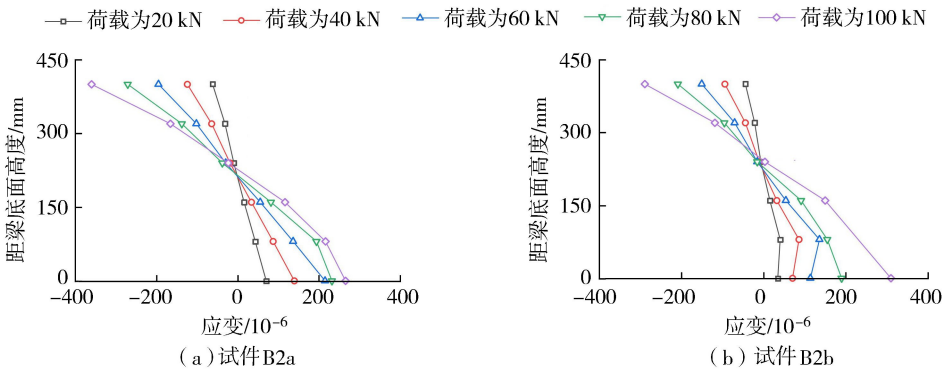


图 3 不同荷载下混凝土应变沿跨中截面高度的分布

Fig.3 Distributions of concrete strains along the height of mid-span section under different loads

2.3 荷载-挠度曲线和特征荷载

由图 4 可知,荷载-挠度曲线被开裂点和屈服点分为了明显的 3 个阶段。相比于试件 B0,3 个混合配筋梁的抗弯刚度均得到了提高,其中试件 B2a 由于配置了更多的 CFRP 绞线和更高的预应力水平,其抗弯刚度最大。由表 2 可知,与试件 B0 相比,混合配筋试件的开裂荷载提高了 74%~146%,屈服荷载提高了 27%~48%,极限荷载提高了 29%~50%,说明配置预应力 CFRP 绞线可以显著提升混凝土梁抗弯性能,而且提高程度受预应力水平和预应力 CFRP 绞线数量的影响。

2.3.1 预应力水平的影响

由表 2 可知,与试件 B0 相比,混合配筋试件(B2a、B2b)的力学性能得到了明显提升,随着预应力水平的提高,试件的开裂荷载、屈服荷载及极限荷载均逐渐提高:当预应力水平从 30% 增大至 45% 时,开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别增大了约 24%、7% 和 6%;相比于试件 B0,开裂荷载的提升幅度从 98% 增加至 146%,屈服荷载的提升幅度从 39% 增加至 48%,极限荷载的提升幅度从 41% 增加至 50%。相比于屈服荷载和极限荷载,预应力水平对梁抗裂性的影响更显著。

2.3.2 预应力绞线数量的影响

由表 2 可知,增加预应力 CFRP 绞线的数量可以显著提高试件的特征荷载。在 45% 预应力水平下,当 CFRP 绞线从 1 根(试件 B1)增加至 2 根(试件 B2a),开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别增加了约 41%、16% 和 16%;试件 B1 的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载相较试件 B0 分别提升了 74%、27% 和 29%,而试件 B2a 分别提升了 146%、48% 和 50%,主要是在相同预应力水平下,试件 B2a 的 CFRP 绞线截面积为试件 B2b 的 2 倍,其总预应力也为试件 B2b 的 2 倍。

2.4 钢筋与预应力 CFRP 绞线应变

混合配筋梁中受拉钢筋的荷载-应变曲线如图 5(a) 所示。整体看,受拉钢筋的荷载-应变曲线呈现 3 个阶段:未开裂前,钢筋应变随荷载的增长非常缓慢增大;试件开裂后,开裂混凝土退出工作,钢筋应变随荷载的增长速度变快;试件屈服后,钢筋应变急剧增加。试件 B0 和 B1 由于没有布置或布置较少的预应力 CFRP 绞线,在相同荷载下这两个试件钢筋分担的应力更大,因此钢筋应变增加较快。增加预应力 CFRP 绞线的数量可以降低钢筋应变的增长,当预应力 CFRP 绞线数量相同时,试件的预应力水平越大,钢筋应变随荷载增长的速度越慢。CFRP 绞线的荷载-应变曲线如图 5(b) 所示,试件 B1 的 CFRP 绞线应变片前期试件准备过程中损坏,故未能采集到数据。整体上看,CFRP 绞线的应变发展趋势呈现出与钢筋应变类似的 3 个阶段,在钢筋屈服后,由于钢筋不能继续承担增加的荷载,导致 CFRP 绞线的应变快速增加。

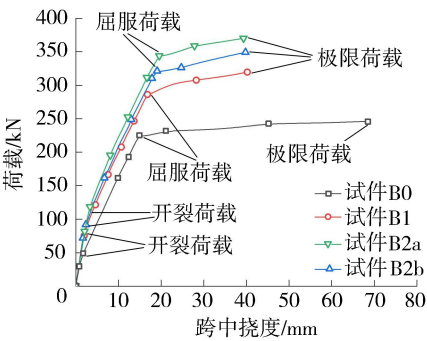


图 4 试件的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load versus mid-span deflection curves of specimens

表 2 试件的特征荷载

Table 2 Characteristic loads of specimens

试件	P_{cr}/kN	$\alpha_{cr}/\%$	P_y/kN	$\alpha_y/\%$	P_u/kN	$\alpha_u/\%$
B0	46		233		246	
B1	80	74	296	27	318	29
B2a	113	146	344	48	369	50
B2b	91	98	323	39	348	41

注: P_{cr} 为开裂荷载, P_y 为屈服荷载, P_u 为极限荷载, α_{cr} 、 α_y 、 α_u 分别为 P_{cr} 、 P_y 和 P_u 相比试件 B0 的提高幅度。

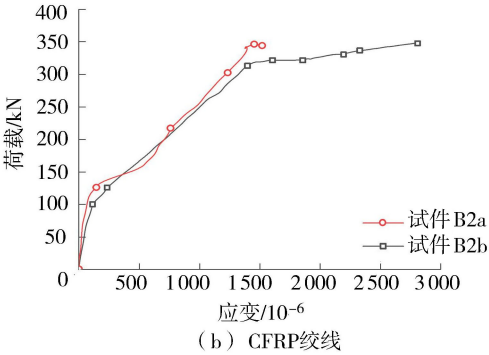
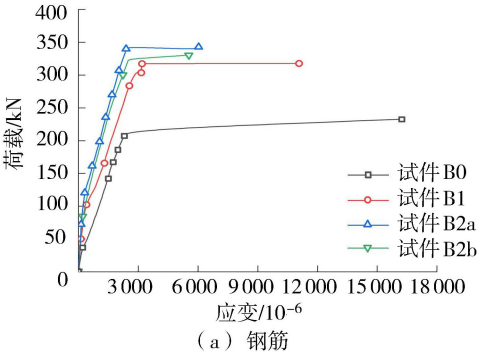


图 5 钢筋和 CFRP 绞线的荷载-应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves of steel bars and CFRP strands

2.5 延性系数

由表3可知,试件B0的延性系数高达4.33,而混合配筋试件的延性系数在2.01~2.27之间,相比试件B0下降了约48%~54%,说明配置预应力CFRP绞线降低了混凝土梁的延性。由于本文试件失效均由混凝土压碎控制,预应力水平和CFRP绞线数量对延性的影响并不明显,比如当预应力水平从30%增至45%,延性系数几乎不变;当增加预应力CFRP绞线数量时,试件延性系数从2.27降低至2.01。但是当失效模式发生改变时,比如从混凝土压碎变成CFRP绞线拉断,试件的延性可能会有更大的改变。

3 抗弯承载力计算

CFRP绞线由多根CFRP单筋扭绞而成,将GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术规范》中预应力FRP筋混凝土梁承载力计算方法用于预应力CFRP绞线混凝土梁抗弯承载力计算,并与试验结果进行对比,以验证预应力FRP筋混凝土梁承载力计算方法在预应力CFRP绞线混凝土梁中的适用性。

由表4可知,试验值和计算值符合很好,3个试件的误差均在5%以内,说明GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术规范》中针对预应力FRP筋混凝土梁的抗弯承载力计算公式依然适用于本文预应力CFRP绞线混凝土梁抗弯承载力的计算。

4 结 论

- a. 配置预应力CFRP绞线可以有效提升混凝土梁的抗弯刚度和承载力,但降低了混凝土梁的延性。本文试验条件下,相比于普通钢筋混凝土梁,混合配筋梁的开裂荷载提高了74%~146%,屈服荷载提高了27%~48%,极限荷载提高了29%~50%,但延性降低了约50%。
- b. 随着预应力水平从30%增大到45%,试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别提升了24%、7%和6%。相同预应力水平下,将预应力CFRP绞线数量从1根增加到2根,试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别提升了41%、16%和16%。
- c. GB 50608—2020中预应力FRP筋混凝土梁抗弯承载力的计算公式依然适用于本文预应力CFRP绞线和钢筋混合增强混凝土梁的抗弯承载力计算。

参考文献:

[1] CAMPIONE G,ZIZZO M. Influence of strands corrosion on the flexural behavior of prestressed concrete beams[J]. Structures, 2022,45:1366-1375.

[2] 李富民,袁迎曙. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(2):78-84. (LI Fumin, YUAN Yingshu. Experimental study on bending property of prestressed concrete beams with corroded steel strands[J]. Journal of Building Structures, 2010,31(2):78-84. (in Chinese))

[3] LU Z H,ZHOU Q H,LI H, et al. A new empirical model for residual flexural capacity of corroded post-tensioned prestressed concrete beams[J]. Structures, 2021,34:4308-4321.

[4] 李富民,邓天慈,王江浩,等. 预应力混凝土结构耐久性研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(2):1-20. (LI Fumin,DENG Tianci,WANG Jianghao, et al. Review of research on durability of prestressed concrete structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015,32(2):1-20. (in Chinese))

[5] 许开成,曹艳明,陈梦成,等. 腐蚀钢绞线与混凝土间的黏结性能[J]. 腐蚀与防护,2018,39(12):912-917. (XU Kaicheng, CAO Yanming, CHEN Mengcheng, et al. Bonding behavior between corroded steel strand and concrete [J]. Corrosion & Protection, 2018,39(12):912-917. (in Chinese))

表3 试件的跨中挠度和延性系数
Table 3 Ductility factors and mid-span deflections of specimens

试件	$\Delta y/mm$	$\Delta u/mm$	$\Delta u/\Delta y$
B0	15.8	68.4	4.33
B1	17.7	40.2	2.27
B2a	19.6	39.3	2.01
B2b	19.7	39.9	2.03

注: Δy 和 Δu 分别为屈服荷载和极限荷载下的跨中挠度, $\Delta u/\Delta y$ 为延性系数。

表4 抗弯承载力计算值与试验值对比
Table 4 Comparison of calculated and test values for flexural capacity

试件	试验值/(kN/m)	计算值/(kN/m)	误差/%
B1	238.5	247.5	3.8
B2a	276.8	282.5	2.1
B2b	260.9	269.9	3.5

[6] 薛伟辰,王晓辉. 有黏结预应力 CFRP 筋混凝土梁试验及非线性分析[J]. 中国公路学报,2007,20(4):41-47. (XUE Weichen,WANG Xiaohui. Experiment and nonlinear analysis of concrete beams with bonded prestressing CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(4):41-47. (in Chinese))

[7] 王海涛,卞致宁,熊浩,等. 黏结层和预应力对 CFRP 板加固损伤钢梁抗弯性能的影响[J]. 复合材料学报,2023,40(3):1718-1728. (WANG Haitao,BIAN Zhining,XIONG Hao,et al. Effects of the adhesive layer and prestress on the flexural behavior of damaged steel beams strengthened with CFRP plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2023,40(3):1718-1728. (in Chinese))

[8] 王海涛,吴刚,张磊. FRP 修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):440-445. (WANG Haitao,WU Gang,ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP strengthened cracked steel plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):440-445. (in Chinese))

[9] 王海涛,朱长玉,熊浩,等. 锚固方法和预应力水平对 CFRP 板加固 RC 梁抗弯性能的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):104-110. (WANG Haitao,ZHU Changyu,XIONG Hao,et al. Study on the effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):104-110. (in Chinese))

[10] 王海涛,陈磊,许国文,等. BFRP 管约束再生混凝土圆柱轴压试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):77-83. (WANG Haitao,CHEN Lei,XU Guowen,et al. Axial compressive experiments of recycled concrete cylinders confined by BFRP tube[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):77-83. (in Chinese))

[11] 李悦媛,许巍,张俊,等. 纤维网格布表层强化混凝土早期开裂特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):114-122. (LI Yueyuan,XU Wei,ZHANG Jun,et al. Early cracking characteristics of concrete strengthened with fiber mesh[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):114-122. (in Chinese))

[12] YONEKURA A,TAZAWA E. Flexural characteristics of prestressed concrete beams using fiber plastic rods as prestressing tendons[J]. Transaction of Japan Concrete Institute,1991,13(1):239-246.

[13] ABDELRAHMAN A A,RIZKALLA S H. Service ability of concrete beams prestressed by carbon-fiber reinforced-plastic bars[J]. ACI Structural Journal,1997,94(4):447-457.

[14] SEN R,ISSA M,SUN Z,et al. Static response of fiberglass pretensioned beams[J]. Journal of Structural Engineering,1994,120(1):252-268.

[15] ABDELRAHMAN A A,RIZKALLA S H. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon[J]. ACI Structural Journal,1997,94(4):447-454.

[16] 周履. 在预应力混凝土结构中采用 FRP 材料[J]. 世界桥梁,1994(1):52-55. (ZHOU Lu. Applying FRP materials in prestressed concrete structures[J]. World Bridges,1994(1):52-55. (in Chinese))

[17] 孟履祥,陶学康,关建光,等. 芳纶纤维筋有黏结部分预应力混凝土梁受弯性能研究[J]. 土木工程学报,2006(3):10-18. (MENG Luxiang,TAO Xuekang,GUAN Jianguang,et al. Experimental study on flexural behavior of partially prestressed concrete beams with bonded AFRP tendons[J]. China Civil Engineering Journal,2006(3):10-18. (in Chinese))

[18] HEO S,SHIN S,LEE C. Flexural behavior of concrete beams internally prestressed with unbonded carbon-fiber-reinforced polymer tendons[J]. Journal of Composites for Construction,2013,17(2):167-175.

[19] 王作虎,杜修力,詹界东. 有黏结和无黏结相结合的预应力 FRP 筋混凝土梁抗弯承载力研究[J]. 工程力学,2012,29(3):67-74. (WANG Zuohu,DU Xiuli,ZHAN Jiedong. The flexural capacity of concrete beams prestressed with bonded and/or unbonded FRP tendons[J]. Engineering Mechanics,2012,29(3):67-74. (in Chinese))

[20] 彭飞. FRP 筋混凝土梁、柱构件承载力计算理论[D]. 上海:同济大学,2019.

[21] WU T,SUN Y,LIU X,et al. Comparative study of the flexural behavior of steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced and prestressed with CFRP tendons[J]. Engineering Structures,2021,233(7):111901.

[22] PABLO P M,SENSALE-COZZANO B. Time-dependent analysis of simply supported and continuous unbonded prestressed concrete beams[J]. Engineering Structures,2021,240(5):112376.

[23] RAFIEIZONOOZ M,KIM J H J,VARAEE H,et al. Testing methods and design specifications for FRP-prestressed concrete members;a review of current practices and case studies[J]. Journal of Building Engineering,2023,73:106723.

(收稿日期:2023-08-10 编辑:刘晓艳)