

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.025

盐雾干湿循环对预应力 CFRP 加固梁抗弯性能影响

洪 雷,王 涛

(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: 为了研究盐雾干湿循环作用下预应力 CFRP 加固梁的抗弯性能,采用 3.5% NaCl 溶液作为干湿循环介质,分别在 0 次、70 次和 140 次干湿循环次数下,对 21 根不同 CFRP 预应力等级的加固梁进行了四点弯曲试验。研究表明:当 CFRP 预应力等级由 15% 提高至 30% 时,加固梁的极限荷载分别提高了 10.0% 和 23.0%,延性系数分别提高了 28.0% 和 65.4%,表明预应力 CFRP 对加固梁抗弯性能的提高有明显效果;在干湿循环作用 70 次与 140 次后,30% CFRP 预应力等级加固梁的极限荷载分别下降了 8.3% 和 15.7%,延性系数分别下降了 7.6% 和 37.9%,表明盐雾干湿循环次数的增加会对预应力 CFRP 加固梁的抗弯性能产生显著影响。

关键词: 预应力 CFRP; 盐雾干湿循环; 极限荷载; 抗弯性能

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0144-06

Flexural Behavior of Beams Strengthened with Prestressed CFRP under Salt Spray Dry – wet Cycles

HONG Lei, WANG Tao

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

Abstract: In order to analyze the flexural behavior of beams strengthened with prestressed CFRP (carbon fiber reinforced polymer) under the salt spray dry-wet cycles, a 4 – point bending test was carried out on 21 beams strengthened with different CFRP prestressing grades, using 3.5% NaCl solution as dry-wet cycling medium with dry-wet cycling times of 0, 70 and 140 respectively. The experimental results showed that with the prestressing grade of CFRP increasing from 15% to 30%, the ultimate load of the strengthened beams was improved by 10% and 23% respectively and the ductility coefficient were improved by 28% and 65.4%. It is indicated that the flexural behavior of the strengthened beams was obviously improved by the prestressed CFRP. After 70 and 140 cycles, the ultimate load of 30% CFRP prestressing grade beams declined by 8.3% and 15.7% respectively and the ductility coefficient declined by 7.6% and 37.9%. It is indicated that the flexural behavior of beams strengthened with prestressed CFRP was influenced significantly by the increasing salt spray dry-wet cycles.

Keywords: prestressed CFRP; salt spray wet – dry cycles; ultimate load; flexural behavior

混凝土结构在长时间服役的过程中,不可避免地会受到老化、恶劣环境等因素的影响而出现结构损伤等问题,而选择对其进行加固补强是一种经济且有效的方法。碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)因其抗拉强度高、耐腐蚀、轻质等特点,为混凝土加固领域的发展提供了新的解决方案。

在实际加固工程中,使用 CFRP 材料也存在着

抗拉强度不能全部发挥即利用率偏低的问题,而采用预应力 CFRP 的方式加固构件能较好的解决该问题^[1-5]。同时在我国沿海地区的建筑结构当中,盐雾侵蚀、干湿循环、冻融等恶劣环境也会对 CFRP 加固混凝土结构造成不利影响,故对 CFRP 加固混凝土结构耐久性能方面的研究十分必要^[6-11]。国内外的研究表明:在盐雾、高温以及干湿循环作用下,CFRP 材料抗拉强度以及弹性模量基本保持不

变,混凝土的抗压强度变化幅度不大,而随着干湿循环的不断进行,建筑结构胶的粘结性能将受到影响,界面破坏形式也会产生改变^[12-13]。但目前多数研究主要针对非预应力 CFRP 材料以及普通混凝土,对预应力 CFRP 加固高强钢筋混凝土结构研究还较少。本文通过使用 3.5% 的 NaCl 溶液来研究盐雾干湿循环侵蚀作用(以下简称干湿循环作用)对不同预应力等级的 CFRP 加固高强混凝土梁的抗弯性能影响。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用 C60 高强混凝土,水泥为 PII 52.5R 普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用一级粉煤灰,河砂,粗骨料选用 5 mm ~ 10 mm 连续级配的碎石,减水剂采用聚羧酸高效减水剂,混凝土配合比见表 1。CFRP 采用日本东丽单向编织碳纤维布,底涂胶和浸渍胶采用 JGN 型纤维建筑结构胶。对 CFRP 材料进行拉伸

测试实验,测得性能参数见表 2。

表 1 C60 高强混凝土配合比

材料名称	水	水泥	粉煤灰	砂	石	减水剂
用量/(kg·m ⁻³)	147	343	65	654	1240	9.16

表 2 CFRP 的材料参数

抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	名义伸长率 /%	名义厚度 /mm
3612.4	238	1.7	0.167

1.2 试件制作

梁的截面尺寸为 80 mm × 120 mm,跨度 L 为 900 mm,净跨 L_1 为 800 mm。底部纵向钢筋采用 2C8,顶部架立筋采用 2A6,箍筋采用 A6@60,在梁跨中的部位箍筋间距布置成 100 mm;底部纵向钢筋为 HRB400,顶部架立筋以及箍筋为 HPB300,截面尺寸及配筋图见图 1。

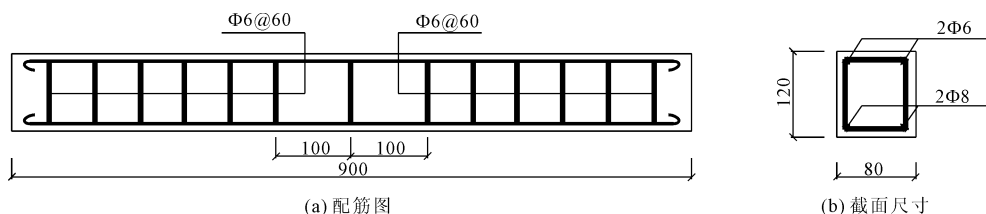


图 1 梁尺寸及配筋图(单位:mm)

对非预应力加固梁,按图 2 所示进行加固。先将梁的底面以及两端需要张贴碳纤维布 U 形箍的表面,使用角磨机打磨平整,清洗干净后在 L_2 所包含的粘结区上依次涂抹底涂胶和浸渍胶,张贴一层长度为 760 mm,宽为 70 mm 的 CFRP 布,并再次涂抹浸渍胶以确保 CFRP 布被完全浸透,最后在梁的两端使用长为 310 mm,宽为 70 mm 的 U 型箍进行张贴加固。

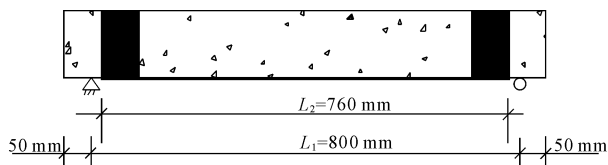


图 2 非预应力加固梁细节图

对预应力加固梁,采用图 3 自行设计的 CFRP 预应力加载装置进行张拉^[14],先将 CFRP 布固定在装置左侧上端的固定夹板,再按顺时针依次绕过支撑杆、加载头、下端的支撑杆,缠绕一圈后,最终将 CFRP 布固定在左侧下端的固定夹板,利用千斤顶逐渐加力,并通过荷载传感器控制预应力大小。待传感器示数稳定后将梁底朝上进行涂胶,实验步骤同上文非预应力加固梁,先在粘结区涂抹结构胶,接着将梁放入 CFRP 布与支撑杆形成的空隙中,再次涂抹浸渍胶以浸透 CFRP 布,并在梁两端张贴 U 型箍进行加固,实验结果如图 4 所示。室温下静置一周时间,待结构胶完全固化后,剪除多余的 CFRP 布。

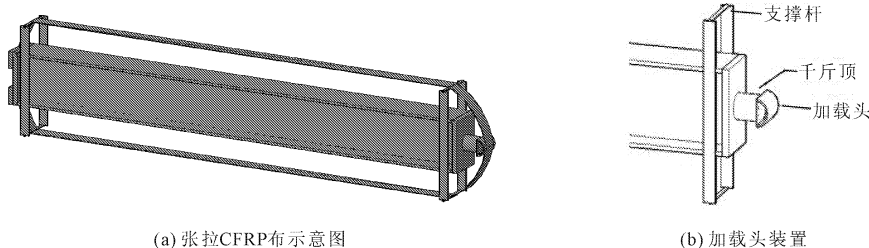


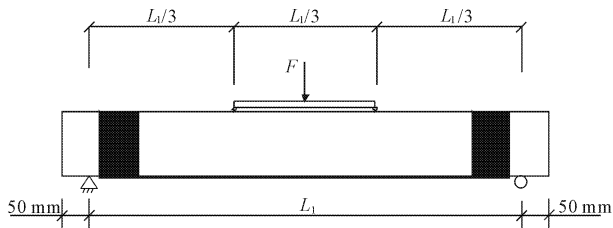
图 3 预应力施加装置



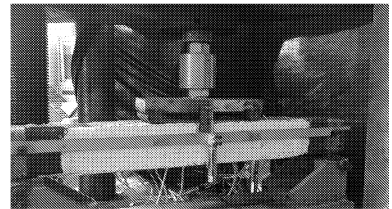
图 4 预应力加固梁试验

将 12 根试验梁放入温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，湿度为 $40\% \pm 5\%$ 的恒温恒湿养护室中，使用自吸泵抽放 3.5% 的 NaCl 溶液进行干湿循环实验。温度及湿度通过全自动温湿度测控仪调控。一次干湿循环控制为 8 h 浸泡和 16 h 干燥，即一次完整的干湿循环时间为 24 h。

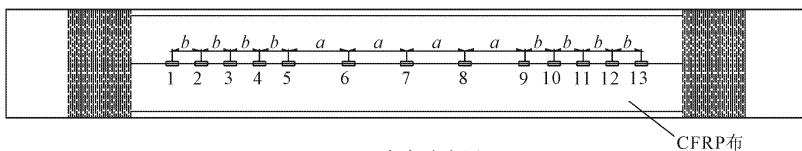
试验中共有 21 根梁，综合考虑了文献[15-16]中最佳预应力模型以及预应力加载装置的实际张拉效果，预应力共设计了三个等级，分别为 CFRP 的抗拉强度标准值(f_{cfk})的 0%、15%、30%。干湿循环次数也有三组，分别为 0 次、70 次和 140 次。根据不同的预应力等级和干湿循环次数进行编号，P 表示预应力等级，W 表示干湿循环次数。如 P00W70 表示预应力为 0% f_{cfk} 即非预应力试件，干湿循环 70 次的



(a) 试验加载示意图



(b) 试验实际加载图



(c) 应变片布置

图 5 试验与测量装置

试件。具体试件编号及设计参数见表 3。

表 3 试件参数

试件编号	预应力等级/%	干湿循环/次	试件根数
P00W00	0	0	3
P15W00	15	0	3
P30W00	30	0	3
P00W70	0	70	3
P30W70	30	70	3
P00W140	0	140	3
P30W140	30	140	3

1.3 试验方案

采用四点弯曲，通过 100T 电液伺服全能试验机施加集中力，再通过定制的分配梁进行加载，分配梁布置在净跨 L_1 的 1/3 处，见图 5(a) 与图 5(b)。通过荷载传感器、LVDT 位移计测量试件极限承载力与跨中极限挠度，通过张贴在梁底 CFRP 材料上的十三个应变片测量其 CFRP 应变变化情况。如图 5(c) 所示，梁底应变片从左至右依次编号，其中 1 号—5 号和 9 号—13 号共十个应变片布置在弯剪段，6 号—8 号共三个应变片布置在跨中纯弯段，图中间距参数 a 为 66 mm， b 为 33 mm。上述数据通过 32 通道的 IMC 进行采集。

2 试验结果与分析

2.1 预应力对加固梁抗弯性能的影响

表 4 给出了干湿循环次数为 0 次时，CFRP 加固梁的开裂荷载与极限荷载。每组试验梁共有三根，各项数值取其平均值。由表 4 可得，与 P00W00 非预应力试件相比，随着 CFRP 预应力等级从 15% 提高到 30%，开裂荷载分别提高了 28.9% 和 38.0%，

极限荷载提高了 10.0% 和 23.0%。预应力 CFRP 对混凝土梁的承载能力提高有明显效果，对开裂荷载的提高更加明显；P30W00 试验梁与 P15W00 试验梁相比，开裂荷载提高的幅度减小了 34.5%，但极限荷载提高了 14.4%，这表明预应力等级的提高对极限荷载的提高更有效。使用加固梁跨中极限挠度与屈服挠度的比值，即延性系数来评价试件的延性性能。从表 4 中可看出，与 P00W00 相比，加固梁

P15W00 与 P30W00 的延性系数分别增加了 28.0% 和 65.4%,表明预应力的施加以及预应力等级的提

高,可以有效提高加固梁的延性性能。

表 4 预应力 CFRP 加固梁的试验结果

试件编号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	屈服挠度/mm	跨中极限挠度/mm	延性系数
P00W00	16.67	65.38	3.30	6.01	1.82
P15W00	21.50	71.95	2.82	6.59	2.33
P30W00	23.00	80.41	2.71	8.17	3.01

图 6 为三条不同预应力等级加固梁的荷载 - 挠度曲线。从曲线中可看出,CFRP 加固梁的荷载 - 挠度三条曲线趋势基本相同,大致分为以下三个阶段:在开裂之前的弹性上升阶段,CFRP 与混凝土梁协同工作,曲线呈现线性增长趋势;在开裂之后的剥离阶段,随着荷载的不断增长,梁底裂缝不断发展,曲线呈现出非线性缓慢增长的态势,其长度代表了加固梁的延性。当试件达到极限荷载之后,主要裂缝扩展至梁顶,CFRP 甚至完全剥离,加固梁承载力迅速下降,达到破坏阶段。

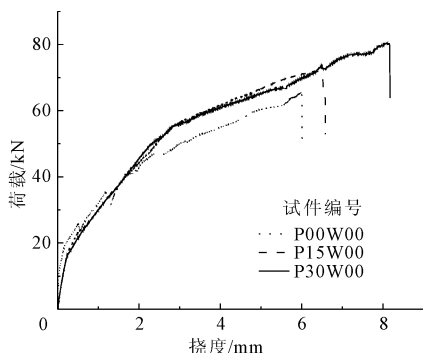


图 6 预应力 CFRP 加固梁的荷载 - 挠度曲线

从图 6 中还可以看出,每条刚度曲线的开裂荷

载所对应的挠度值相差不大,而随着预应力 CFRP 等级的提高,极限挠度明显增加,从而得到开裂之后的剥离阶段长度明显增加的结论。这表明随着预应力 CFRP 等级的提高,剥离阶段长度增加,加固梁的延性得到了提高。

2.2 盐雾干湿循环对加固梁抗弯性能的影响

2.2.1 盐雾干湿循环对承载力的影响

表 5 为干湿循环作用下,2 组不同预应力等级的加固梁开裂荷载及极限荷载的变化情况。在干湿循环条件下,对非预应力的试验梁进行分析,其开裂荷载出现先小幅度增加后降低的现象。这是由于在试验初期,随着干湿循环的不断进行,混凝土发生后期水化,其强度得到提高,而混凝土强度的提高会增强界面的粘结性能;此外,有研究表明^[17],建筑结构胶内部的树脂高聚物会发生后期固化反应,这也会增强界面的粘结力,从而提高试件的承载力。而当经历了 140 次干湿循环后,非预应力试验梁的开裂荷载明显下降,与 0 次循环相比下降了 10.6%。对预应力试验梁分析,其 0 次与 70 次干湿循环的开裂荷载数值特别接近,同样也应是受到了上述提及的后期水化与后期固化反应的影响所致。在经历 140 次干湿循环后,开裂荷载降幅为 16.2%。

表 5 干湿循环作用下试件的试验结果

试件编号	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	屈服挠度/mm	跨中极限挠度/mm	延性系数
P00W00	16.67	65.38	3.30	6.01	1.82
P00W70	17.85	64.90	3.25	5.99	1.84
P00W140	14.90	59.50	3.48	6.09	1.75
P30W00	23.00	80.41	2.71	8.17	3.01
P30W70	22.80	73.70	2.69	7.48	2.78
P30W140	19.28	67.79	3.03	5.67	1.87

在经历干湿循环后,非预应力试验梁与预应力试验梁的极限荷载均呈现出逐渐降低的规律。对非预应力的试验梁进行分析,P00W70 与 P00W140 的极限荷载下降比例分别为 0.73% 和 9.0%;对预应力的试验梁进行分析,P30W70 与 P30W140 的极限荷载下降比例为 8.3% 和 15.7%。这表明在干湿循

环作用下,预应力等级越大,开裂荷载及极限荷载的降幅越明显,对加固梁的抗弯性能影响越大。

从表 5 列出的延性系数可以看出,试验梁 P00W140 在经历 140 次干湿之后,延性系数同比 P00W00 试验梁仅下降了 3.9%,而试验梁 P30W140 同比 P30W00 下降了 37.9%。表明在 140 次的干湿

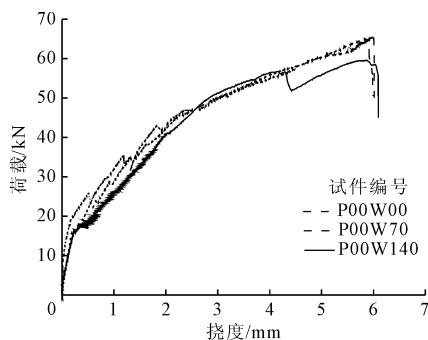
循环条件下,加固梁的延性变差,并且在 30% 预应力等级的条件下更加明显。

2.2.2 盐雾干湿循环下荷载-挠度曲线

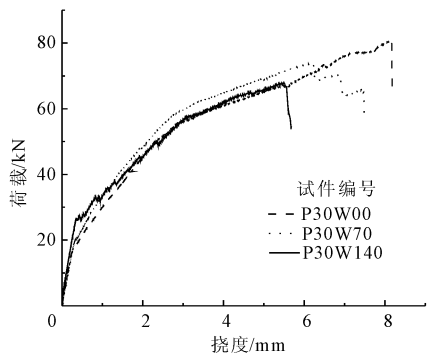
图 7 为 P00 非预应力加固梁与 P30 预应力加固梁经历干湿循环作用后的荷载-挠度曲线。从图 7(a)和图 7(b)可以看出,两组加固梁在干湿循环作用下均表现出:在弹性阶段 CFRP 与高强混凝土梁粘结良好,试件处于弹性状态,三条刚度曲线大致重合;而在剥离阶段后期以及破坏阶段,由于极限荷载不同,刚度曲线差异较大。

从图 7(a)中可看出,对于 P00 非预应力加固梁,0 次与 70 次干湿循环的刚度曲线基本重合,140 次干湿循环在剥离阶段出现较明显差异,CFRP-混凝土界面的粘结性能显著降低。说明只有在高次数的干湿循环才会对 CFRP 加固梁的抗弯性能造成明显影响。

从图 7(b)中可看出,对于 P30 预应力加固梁,与 0 次、70 次干湿循环相比,当经历了 140 次干湿循环后,其刚度曲线剥离阶段的长度明显缩短,说明预应力加固梁经历过干湿循环后,它的破坏会更加迅速,延性更差。



(a) P00 非预应力



(b) P30 预应力

图 7 干湿循环下预应力 CFRP 加固梁的荷载-挠度曲线

2.2.3 盐雾干湿循环下梁底 CFRP 应变分析

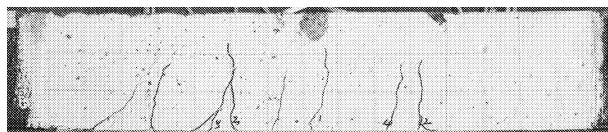
研究了在不同干湿循环条件下非预应力加固梁和预应力加固梁 CFRP 应变的变化。加固梁在开裂

荷载之前,CFRP 应变增长缓慢,应变数值从 7 号应变片即梁跨中位置向梁两端逐渐减小;而在开裂后,纯弯段的 6、7、8 号应变片出现 CFRP 数值的大幅度增长的情况,这是由于在这些部位最早出现裂缝,CFRP 与混凝土从协同合作的弹性状态脱离,CFRP 受到了从混凝土表面传递过来的拉应力,导致数值大幅度激增;随着上部荷载的增加,当钢筋达到屈服状态时,纯弯段的 CFRP 应变数值增长幅度变大,此时拉应力主要由 CFRP 承担。随着荷载进一步的增加,CFRP 界面发生剥离,试件最终破坏。

2.3 破坏形态分析

2.3.1 预应力对剥离形态的影响

以图 8 未经过干湿循环的 3 组不同预应力等级的加固梁为例,所有加固梁均发生了由中部弯剪主裂缝引起的界面剥离破坏。在试验初始阶段,梁跨中部位最早出现竖向裂缝,之后在弯剪段逐渐出现斜向裂缝。当上部荷载继续增大时,斜向裂缝逐渐发展成主裂缝。当主裂缝处的 CFRP-混凝土界面发生剥离并逐步向端部延伸时,最终导致梁被破坏。对比 P00W00、P15W00 与 P30W00 加固梁的梁侧裂缝可以发现,P30 加固梁的裂缝数量最多,且主裂缝宽度较大;剥离后 CFRP 上附着的混凝土颗粒也更多,这些表明预应力等级的提高可以有效增强界面的粘结性能,提高加固梁的抗弯性能。



(a) P00W00



(b) P15W00



(c) P30W00

图 8 预应力 CFRP 加固梁的破坏形态

2.3.2 干湿循环对剥离形态的影响

图 9(a)—图 9(c)为干湿循环 0 次、70 次、140 次非预应力加固梁 CFRP 一侧的剥离面。随着干湿循环侵蚀作用的不断加强,加固梁破坏后 CFRP 上粘下的混凝土颗粒有明显变少的趋势。如图 9(c),在

长时间的干湿循环作用后,在部分区域甚至可以看到结构胶层。由此可看出随着干湿循环侵蚀作用的

加强,破坏面由混凝土表层逐渐向结构胶-混凝土界面发展,干湿循环使得界面粘结的强度下降。

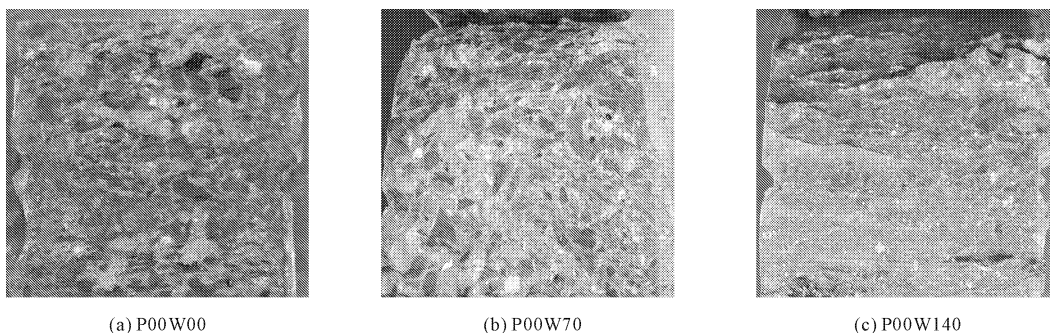


图9 干湿循环后试件破坏面

3 结论

(1) 预应力 CFRP 对加固梁抗弯性能的提高有明显效果。

(2) 盐雾干湿循环对预应力加固梁抗弯性能有显著劣化影响。

(3) 在较高次的干湿循环条件下,预应力等级越高,NaCl 溶液对于加固梁的 CFRP - 混凝土界面的侵蚀越严重,导致加固梁的抗弯承载力下降越明显,破坏会更加迅速,加固梁表现出的脆性现象也会更加显著。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 童谷生, 李志虎, 朱成九, 等. 预应力碳纤维布材加固混凝土梁的受弯性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(2): 1-5.

[4] Barros J A O, Fortes A S. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(4): 471-480.

[5] 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.

[6] Soudki K, El - salakawy E, Craig B. Behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams in corrosive environment[J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(3): 291-298.

[7] Almusallam T H. Load-deflection behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets subjected to different environmental conditions[J]. Cement Concrete Composites, 2006, 28(10): 879-889.

[8] Toutanji H A, Gómez W. Durability characteristics of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets[J]. Cement & Concrete Composites, 1997, 19(4): 351-358.

[9] 洪雷, 张雨剑, 王苏岩. 冻融循环作用下 CFRP - 高强混凝土的界面行为[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 200-205.

[10] 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.

[11] 王苏岩, 朱方芳, 张红涛, 等. 持载与湿热环境下 CFRP 加固高强混凝土梁结构性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 36-41.

[12] 王苏岩, 丁荔, 洪雷, 等. 持载与干湿循环作用下 CFRP 加固高强混凝土梁耐久性研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(21): 78-83.

[13] 李伟文, 徐文冰, 周英武, 等. 硫酸盐溶液干湿循环对 FRP 加固混凝土梁抗剪性能的劣化作用[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(8): 1226-1231.

[14] 曲俊龙, 洪雷. 一种 FRP 预应力加载试验装置: 中国. 201820055622.8[P]. 2018-01-15.

[15] 黄坤. 钢筋混凝土梁加固中碳纤维预应力值范围的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014: 114-115.

[16] 江胜华, 侯建国, 何英明. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁的预应力水平的合理取值范围研究[J]. 建筑技术开发, 2008, 35(8): 35-37.

[17] 万先虎. 高温干湿交替环境下 FRP - 混凝土界面粘结性能的耐久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 18-28.