

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.030

长周期干湿交替下预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能

王涛¹, 洪雷²

(1. 杭州市萧山区村镇建设管理处, 浙江 杭州 311200;

2. 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: 为了研究长周期干湿交替环境对预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能影响,对 4 组试件进行干湿循环的实验,次数设计为 0 次、70 次、140 次、280 次,预应力水平均为 CFRP 材料抗拉强度标准值的 30%。结果表明,干湿交替 70 次、140 次、280 次后,试件的极限荷载下降比例分别为 8.3%、15.7% 以及 23.7%,跨中极限挠度下降比例分别为 8.4%、30.6% 和 33.2%,延性系数分别下降了 7.6%、37.9% 和 41.5%;CFRP 极限应变在经历了 280 次干湿交替后减少了 48%,材料利用率大幅降低,且加固试件脆性破坏现象更加明显。这些结果表明长周期的干湿交替会对预应力 CFRP 加固 RC 梁的抗弯性能造成显著损害。

关键词: 长周期;干湿交替;预应力 CFRP;抗弯性能

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0170—07

Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP in Long Period of Dry – Wet Cycles

WANG Tao¹, HONG Lei²

(1. Xiaoshan Village Construction Management Service, Hangzhou, Zhejiang 311200, China;

2. 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 RC beams strengthened with prestressed CFRP (carbon fiber reinforced polymer) in the long period of dry-wet cycles, the experiments were carried out on the four sets of specimens with 0, 70, 140, 280 cycles, and the prestressing grades were all 30% of the tensile strength standard value of CFRP. After 70, 140 and 280 cycles, the results showed that the ultimate load of specimens were declined by 8.3%, 15.7% and 23.7% respectively. At the same time, the ultimate deflection at midspan of beams were declined by 8.4%, 30.6% and 33.2% respectively, and the ductility coefficient were declined by 7.6%, 37.9% and 41.5% respectively. The CFRP ultimate strain reduced by 48% after 280 cycles. The material utilization had a significant reduction, and the brittle failure of the strengthened beams became more obvious. The results indicated that the long period of dry – wet cycles did significant damage to the bending capacity of RC beams strengthened with prestressed CFRP.

Keywords: long period; dry-wet cycles; prestressed CFRP; bending capacity

使用预应力 CFRP 材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymer) 可以有效地发挥材料本身的高强性能,因此在加固工程中得到很多应用^[1-5]。而在沿岸港口工程当中存在的各种恶劣环境因素,如长时

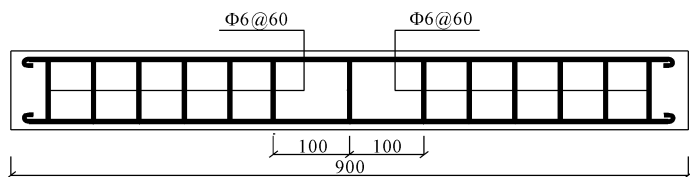
间的干湿交替、盐雾腐蚀、冻融等对预应力 CFRP 加固结构的性能提出了更高的要求^[6-7]。目前有研究指出干湿交替会对粘结界面造成劣化,并且预应力水平愈高,劣化效果会愈加明显^[8-9]。在本文中—

次完整的干湿交替为在 3.5% 盐水环境中浸泡 8 h, 之后加速干燥 16 h。目前国内外采用相同或类似干湿循环实验方案的研究成果指出, 在相对较短的循环周期如 30 次 ~ 50 次内, 试件会因为材料二次水化等原因, 抗弯刚度反而得到提升, 故 CFRP 加固梁要经历相对较长的循环周期时才会受到明显不利影响^[10]。除此之外, 干湿实验所采用的最长循环周期大都控制在 120 次 ~ 180 次, 超过 200 次的长周期干湿循环则相对较少^[11-14]。故有必要开展长周期盐雾干湿交替侵蚀对预应力碳纤维布加固 RC 梁抗弯性能影响的研究。本文在文献[15]的研究基础上进一步开展试验, 通过 4 组经过 0 次、70 次、140 次、280 次盐雾干湿循环侵蚀的试件, 研究长周期干湿交替对预应力碳纤维布加固 RC 梁的抗弯性能影响。

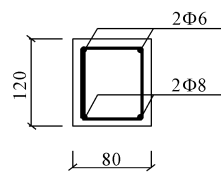
1 试验概况

1.1 试验材料

试验采用 C60 高强混凝土, 掺合料包括 PII 52.5R 硅酸盐水泥、一级粉煤灰、河砂、5 mm ~ 10 mm 连续级配的碎石、高效减水剂等, 配合比见表 1。CFRP 采用日本东丽单向编织碳纤维布, 测得材料相关性能参数见表 2。底涂胶和浸渍胶采用 JGN 型纤维建筑结构胶, 材料参数见表 3 和表 4。



(a) 配筋图



(b) 截面尺寸

图 1 梁尺寸及配筋图(单位:mm)

图 2 为自行设计的 CFRP 预应力加载装置^[16], 按以下步骤制作加固梁试件: 首先裁剪出一段宽为 70 mm 的 CFRP 布, 然后将布的一端置于加载装置左上角的固定夹板处, 使用螺栓进行固定。接着再按顺时针方向将 CFRP 布依次绕过支撑杆、加载头、装置下方的支撑杆, 这些部位均提前抹好润滑油以保护碳纤维布。最后将 CFRP 布的另一端固定在左下角的固定夹板处。接着手摇机械千斤顶缓慢施加预应力, 待达到 30% 预应力水平后, 将梁底朝上依次涂上底涂胶以及浸渍胶, 将梁放入 CFRP 布与支撑杆形成的间隙当中, 并在布表面再次涂上浸渍胶以确保 CFRP 布被完全浸润, 最后在梁两端张贴 U 型箍进行加固, 实验结果如图 3 所示。室温养护后去除多余的 CFRP 布, 得到的加固梁示意图如图 4 所示。

表 1 C60 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

表 3 底涂胶性能参数

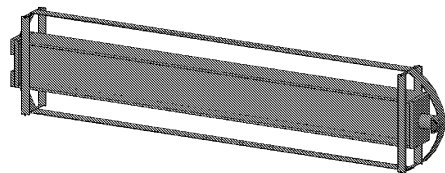
混凝土正拉黏结强度/MPa	抗拉强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	拉伸率 /%
≥2.5	≥26	≥50	≥1.5

表 4 浸渍胶性能参数

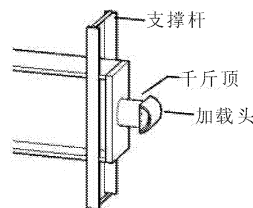
混凝土正拉黏结强度/MPa	抗拉强度 /MPa	抗弯强度 /MPa	拉伸率 /%
≥2.5	≥40	≥55	≥1.8

1.2 试件制作

梁的尺寸及配筋如图 1 所示。截面尺寸为 80 mm × 120 mm, 跨度及净跨分别为 900 mm 与 800 mm。配筋方案为梁底纵筋 2C8, 架立筋 2A6, 箍筋 A6@60, 跨中位置箍筋间距 100 mm; 2 根梁底纵筋牌号为 HRB400, 其余钢筋牌号为 HPB300。



(a) 张拉 CFRP 布示意图



(b) 加载头装置

图 2 预应力施加装置

将 12 根试验梁放入恒温恒湿养护室中, 温度控

制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 湿度控制在 $40\% \pm 5\%$ 。抽放 3.5% 的盐溶液进行干湿交替循环, 一次完整的循环实验为浸泡 8 h 以及干燥 16 h。预应力水平为碳纤维布材料抗拉强度标准值 (f_{cfk}) 的 30%。干湿交替次数分别为 0 次、70 次、140 次以及 280 次。使用 P 代表预应力水平, W 代表干湿交替次数。试件编号及相关参数见表 5。



图 3 预应力加固梁试验

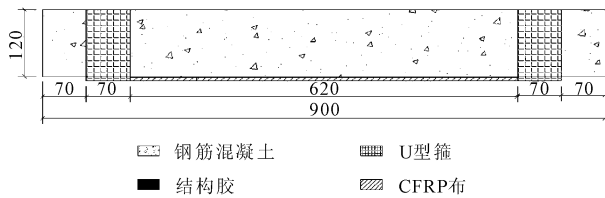
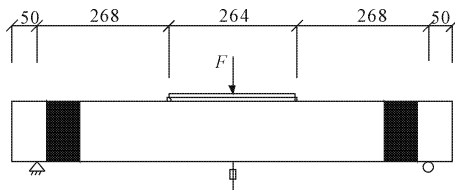
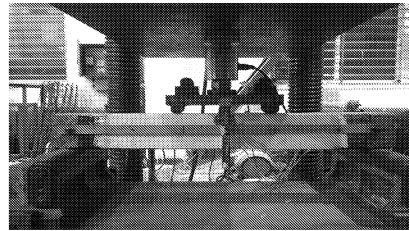


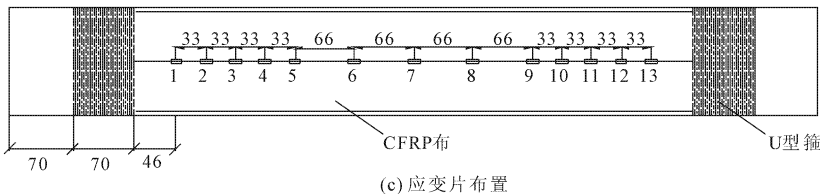
图 4 加固试件示意图(单位:mm)



(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(单位:mm)

表 5 试件参数

试件编号	预应力等级 /%	干湿循环 /次	试件根数
P30W00	30	0	3
P30W70	30	70	3
P30W140	30	140	3
P30W280	30	280	3

1.3 试验方案

加载采用四点弯曲。100 t 电液伺服试验机先对分配梁施加集中力, 再通过分配梁对试件施加荷载。分配梁布置在净跨的三等分点处, 具体见图 5(a) 与图 5(b)。可以看出, 分配梁的加载点将梁的净跨部位划分成 3 段, 分别为中间的纯弯段以及两侧的弯剪段。实验使用荷载传感器、LVDT 位移计测量试件的承载力与跨中挠度, 通过布置在梁底 CFRP 布上的 13 枚应变片测量 CFRP 应变值, 应变片编号及间距如图 5(c) 所示。此外通过预先布置在梁底纵筋上的 2 枚应变片, 测量受拉钢筋的应变变化情况。上述数据均使用 IMC 仪器进行采集。

2 试验结果与分析

2.1 长周期干湿循环对抗弯能力的影响

表 6 列出了试件经过干湿侵蚀作用后的开裂荷载与极限荷载, 并以此绘制出图 6 两种荷载的变化曲线, 从中发现在 280 次干湿侵蚀作用之后, P30W280 试件的开裂荷载与极限荷载明显降低。由表 6 可得, 加固梁在 70 次、140 次、280 次干湿交替后, 与 P30W00 试件相比其开裂荷载降幅分别为

0.87%、16.12% 以及 22.0%, 荷载曲线衰减趋势变缓; 极限荷载分别减少了 8.3%、15.7% 以及 23.7%, 曲线下降速率也明显减小。这表明长周期的盐雾干湿交替循环会对预应力 CFRP 加固梁的承载性能造成明显损害, 并且承载能力的降低速率随干湿交替次数增多表现出逐渐减小的规律。

表 6 还列出了试件梁的跨中极限挠度以及延性系数变化情况。与未经历过干湿交替的试件相比, 加固梁在 70 次、140 次、280 次干湿侵蚀后跨中极限

挠度分别减小了 8.4%、30.6% 和 33.2%，延性系数降低了 7.6%、37.9% 和 41.5%。这表明在长周期的盐雾干湿循环条件下，加固试件的延性系数会大

幅下降，延性性能受到明显不利影响。与承载能力的变化规律相同，随着干湿侵蚀的程度不断加深，延性系数下降会愈来愈趋缓。

表 6 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
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
P30W280	17.95	61.28	3.10	5.46	1.76

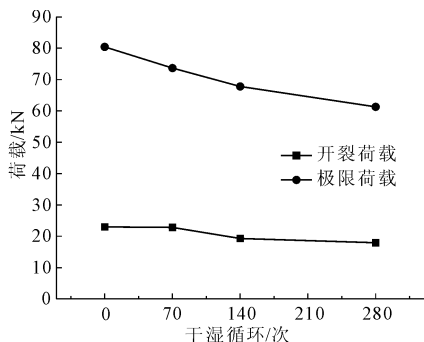


图 6 预应力试件的开裂荷载与极限荷载

图 7 为干湿交替作用下试件的抗弯刚度曲线。

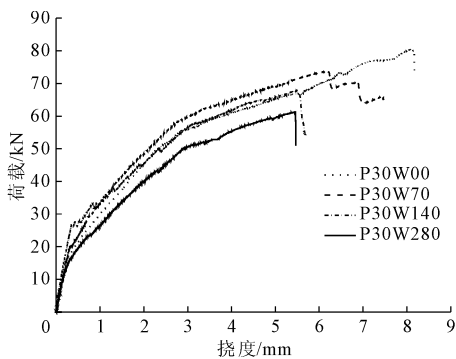


图 7 干湿循环下预应力 CFRP 加固梁的荷载 - 挠度曲线

由图 7 可知,4 组试件的刚度曲线都可概括为:CFRP 与混凝土梁共同工作的弹性上升阶段,刚度曲线表现出线性增长的特点;在混凝土开裂后,梁底裂缝随着上部荷载不断扩展,曲线呈现出非线性缓慢增长的态势,这就是试件剥离阶段的曲线特点,其长度代表了加固梁的延性。当主裂缝发展至梁顶时,梁底碳纤维布完全剥离,刚度曲线骤降,此时试件被最终破坏。通过对比 4 组曲线发现,P30W280 试件在弹性阶段就与其他三组刚度曲线出现分离,剥离阶段的长度大幅缩短,加固梁延性变差,并且在剥离阶段后期及破坏阶段,极限荷载能力大幅削减,抗弯刚度受到明显影响。在湿润环境中,建筑结构胶内

部的分子键会出现断裂,胶体的抗剪能力下降,同时随着干湿环境的不断循环交替,结构胶与混凝土这两种基体材料都在反复吸水膨胀与干燥回缩,由于材料膨胀回缩的性能参数不同,在粘结界面处就会逐渐出现微小裂缝,此外盐溶液也会通过不断地侵蚀与结晶,加剧裂缝的扩张延伸。所以长周期的干湿交替会对碳纤维布与混凝土基体界面造成极大损伤,使得加固梁延性、抗弯性能明显变差。

2.2 破坏形态分析

图 8 给出了干湿循环 140 次与 280 次两组试件的试件破坏形态。

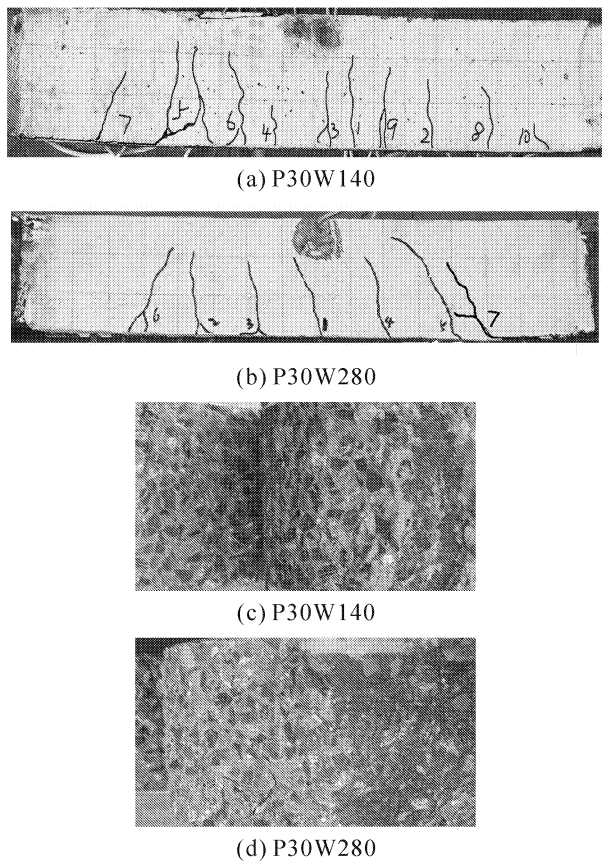


图 8 试件破坏形态

两组试件均发生了由中部弯剪斜裂缝引起的界面剥离破坏,说明长周期的循环侵蚀作用对加固梁的破坏形式并未造成影响。从图 8(a)与图 8(b)中可得 P30W280 试件的裂缝数量略有减少,主裂缝宽度变小,梁底的 CFRP 布对是试件的加固作用减弱。观察图 8(c)与图 8(d)中两组试件破坏面的情况,发现剥离的位置从混凝土表层向胶界面-混凝土界面发展,并且有向 CFRP-结构胶界面一侧发展的趋势。经过 280 次交替侵蚀后,加固梁破坏时剥离下来的 CFRP 布上可以观察清晰且光滑的结构树脂胶层,这表明在长周期的干湿循环下预应力 CFRP 加固梁的界面粘结性能退化已经十分显著,粘结界面受损严重。

2.3 梁底 CFRP 应变分析

对图 9 进行分析,发现 4 组试件梁底的 CFRP 应变曲线均发生了不同程度的波动。这是因为干湿侵蚀的劣化效果,削弱了 CFRP 抑制裂缝开展的能力,从而使得加固梁底部汇集形成多条宽度较大的破坏裂缝,导致 CFRP 布上受力不均,由此带来 CFRP 应

变曲线随加载出现波动的情况。而与其他几组试件相比,P30W280 加载至接近极限荷载时(60 kN),1 号至 13 号应变片的数值都出现了突增的情况,曲线上出现了多个应变峰值。这是因为长周期的干湿循环对碳纤维布与混凝土界面黏结性能损害严重,使得试件在处于最后的破坏阶段时,梁上的小裂缝急剧扩张成大裂缝,并马上达到试件承载能力的极限,出现脆性破坏的恶劣情况。

裂缝扩张具有一定的随机性,故图 9 中 CFRP 应变极值不一定出现在纯弯段。为了统一比较交替侵蚀对各组试件 CFRP 极限应变的影响,采用取纯弯段 6~8 号应变片平均值的方法,制作出的影响曲线如图 10 所示。由图 10 可知随着侵蚀程度的加深,CFRP 极限应变不断变小,同时下降速率逐渐减小。在经历了 280 次循环后,试件的极限应变数值减少了 48%,仅为实验初始时刻的一半左右。这说明经过长周期的干湿侵蚀作用之后,CFRP 材料的利用率将会大幅降低。

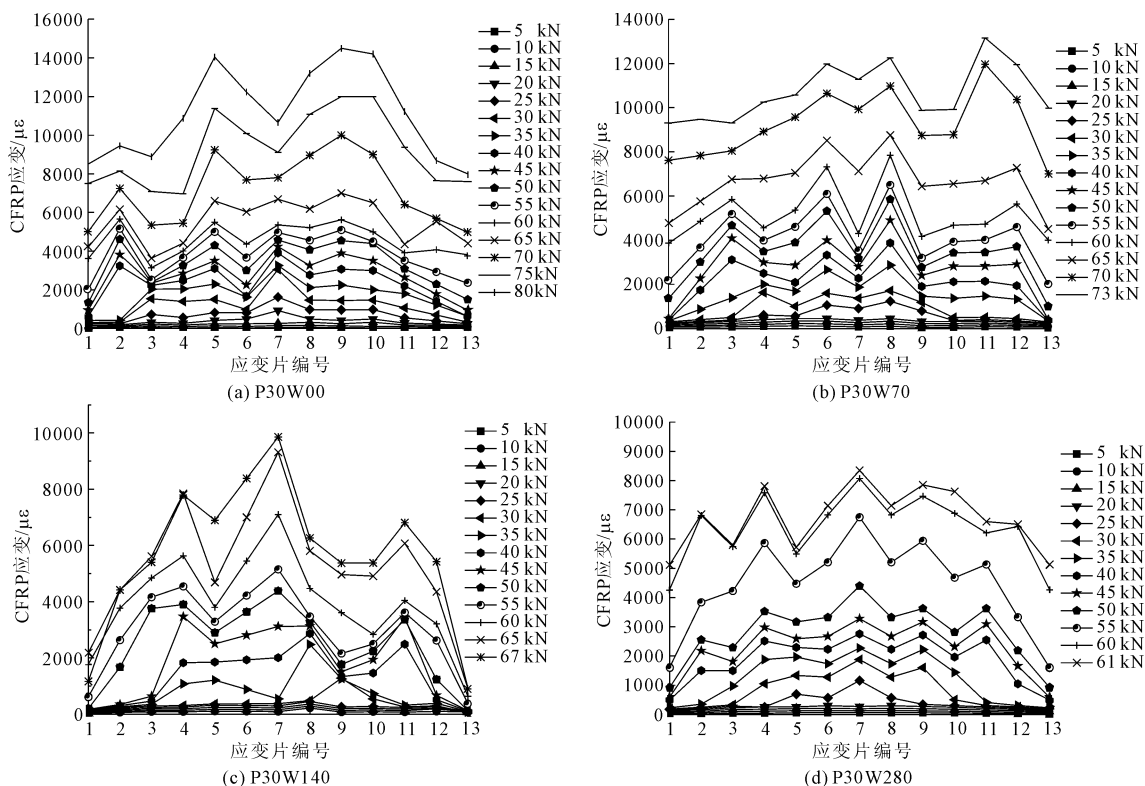


图 9 CFRP 应变分布

2.4 钢筋应变与 CFRP 应变分析

图 11 为 4 组试件跨中 CFRP 与梁底纵筋的荷载-应变曲线,大致可归纳为三个阶段:实验初期受拉纵筋与 CFRP 共同承担荷载,两条曲线都是弹性

增长;加载至超过混凝土开裂强度时,两条曲线开始出现明显分离,CFRP 应变值显著提高,进入非线性增长的状态;当受拉钢筋达到屈服状态时,钢筋应力保持不变,此时 CFRP 布会承担大部分的荷载直至

试件最终破坏。

图 11 中 4 组试件在干湿交替侵蚀后出现了跨中 CFRP 与受拉钢筋荷载 - 应变曲线逐渐重合的现象。对 4 组试件当中 CFRP 的荷载 - 应变曲线对比分析,发现在钢筋屈服前的阶段,相同荷载下 CFRP 应变随着干湿交替次数的增加而明显减小。同时对 4 组试件当中钢筋的荷载 - 应变曲线,发现 4 组钢筋的屈服应变基本相同,均在 $2\ 500\ \mu\epsilon$ 左右。故 CFRP 应变与钢筋应变的差值会随着交替侵蚀程度加深而不断减小,两条应变曲线逐渐重合。这说明干湿侵蚀对钢筋与混凝土之间黏结性能的影响可以忽略不计,主要是对 CFRP - 混凝土粘结界面造成了损害,导致界面胶层传递应力的能力降低,而长周

期的盐雾干湿交替侵蚀对粘结界面造成更加恶劣的损害作用,极大地降低了 CFRP 承担荷载的能力,使得 CFRP 与钢筋曲线重合程度大幅提高。

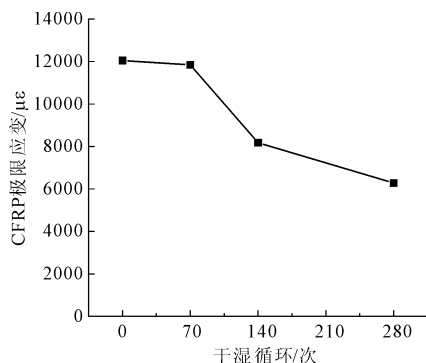


图 10 干湿循环对预应力 CFRP 极限应变的影响

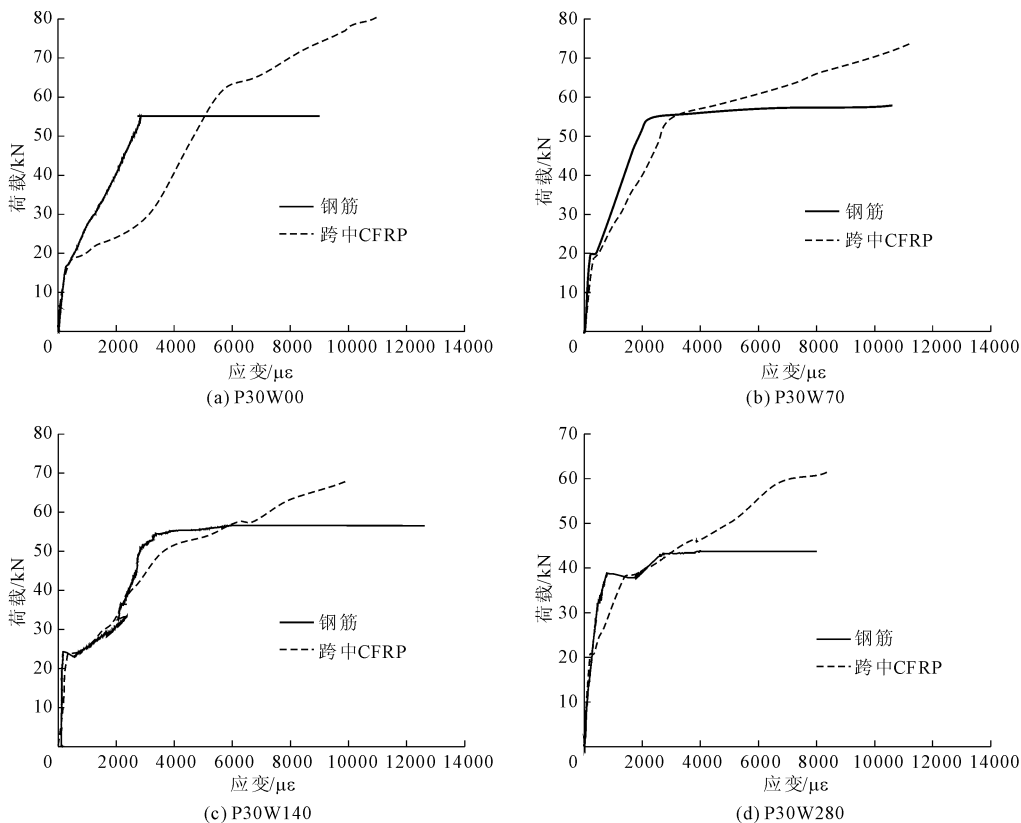


图 11 受拉纵筋与 CFRP 的荷载 - 应变曲线

3 结论

本文研究了长周期干湿循环侵蚀作用对预应力 CFRP 加固梁的抗弯性能影响。得出结论如下:

(1) 长周期的干湿循环会使得预应力 CFRP 加固梁的开裂荷载、极限荷载显著下降,延性系数会大幅减小,降低速率随干湿交替次数增多表现出逐渐减小的规律。

(2) 280 次循环后 CFRP 极限应变下降了 48%,说明长周期的干湿交替侵蚀作用对 CFRP 极限应变的损害非常显著,大大降低了 CFRP 材料的有效运用率,对预应力 CFRP 加固梁抗弯性能造成极大的不利影响。

(3) 长周期的干湿循环侵蚀作用会对 CFRP - 混凝土的粘结界面造成显著劣化作用,导致界面胶层传递应力的能力降低,实验加载时试件的脆性破

坏更加明显。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Lou T J, Liu M Y, Sergio M R, et al. Effect of bond on flexure of concrete beams prestressed with FRP tendons [J]. Composite Structures, 2017, 173:168-176.
- [3] Aslam M, Shafiqh P, Jumaat M Z, et al. Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers - A review [J]. Construction & Building Materials, 2015, 82: 235-256.
- [4] 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.
- [5] Gao P, Gu X, Mosallam A S. Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates [J]. Composite Structures, 2016, 157: 33-50.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 洪雷,江海鑫. 干湿循环下预应力 CFRP 加固高强混凝土的耐久性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(12):143-148.
- [9] 王吉忠,杨俊龙,崔文佳. 盐溶液干湿循环对 CFRP - 混凝土界面粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8):2055-2064.
- [10] 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.
- [11] Silva M A G, Fonseca B S, Biscaia H. On estimates of durability of FRP based on accelerated tests[J]. Composite Structures, 2014, 116:377-387.
- [12] 姚因杰. 恶劣环境与荷载作用下 FRP - 高强混凝土耐久性试验及数值研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016:30-41.
- [13] 江海鑫. 冻融和干湿循环下预应力 CFRP 加固高强混凝土的耐久性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [14] 邓文明. 氯盐环境下 BFRP 板加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[D]. 南宁:广西大学, 2016:40-65.
- [15] 洪雷,王涛. 盐雾干湿循环对预应力 CFRP 加固梁抗弯性能影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3):144-149.
- [16] 曲俊龙,洪雷. 一种 FRP 预应力加载试验装置: 201820055622. 8[P]. 2018-01-15.

(上接第 64 页)

- [4] 董秀军,黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2):3629-3635.
- [5] 李万逵. 激光扫描在阿尔塔什右岸高边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2):66-72.
- [6] 张会霞,朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [7] 荆海峰,王力,杨文锋,等. 自由设站法在点云拼接中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1):94-96, 98.
- [8] 刘尚蔚,朱小超,张永光,等. 多片点云数据拼接处理技术的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1):121-124.
- [9] 刘浩,张冬阳,冯健,等. 地面三维激光扫描仪数据的误差分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4):38-41.
- [10] 魏小佳,黄润秋,裴向军,等. 三维激光技术在高陡危岩体调查中的应用[J]. 工程勘察, 2014, 42(3):57-63, 69.
- [11] 吴雪楠,向喜琼,沈焱辉,等. 三维激光技术在危岩体地质信息采集中的应用[J]. 勘察科学技术, 2016(6):53-56.
- [12] 王梓龙,裴向军,董秀军,等. 三维激光扫描技术在边坡地质编录中的应用[J]. 人民黄河, 2018, 40(5):111-115, 121.
- [13] 黄江. 三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中的应用与讨论[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11):45-49.
- [14] 孙玉科. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1980:58-71.
- [15] 中国地质灾害防治工程行业协会. 崩塌防治工程勘察规范(试行):T/CAGHP 011—2018[S]. 武汉:中国地质大学出版社, 2018:25-30.