

文章编号: 1001-4888(2014)03-0344-09

冻融循环下预应力 CFRP 板加固 钢筋混凝土梁的耐久性研究^{*}

彭晖^{1,2}, 王浩³, 付俊俊¹, 李知兵⁴, 张克波^{1,2}

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南长沙 410114; 2. 长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南长沙 410114;
3. 四川安固土木工程技术有限公司, 四川成都 610036; 4. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 预应力 CFRP 加固混凝土结构技术由于具有显著优势, 越来越多地被应用在桥梁加固中, 本文针对冻融循环作用下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的耐久性能进行了实验研究。通过 12 片加固梁试件的实验研究了不同次数冻融循环作用下预应力 CFRP 板加固梁的破坏形态和承载性能, 分析了混凝土强度等级、冻融循环次数、CFRP 初始应力水平等因素对加固梁耐久性能的影响。实验结果表明: 经历冻融循环后试件的开裂荷载和极限承载能力都有了不同程度的下降, 冻融侵蚀对 CFRP 加固混凝土结构产生了明显的不利影响; 随着冻融循环次数的增加, 加固试件的破坏模式逐渐由混凝土保护层剥离转变为界面剥离的破坏形态; 冻融循环作用对预应力加固试件的整体不利影响要大于非预应力试件; 混凝土强度为 C60 的预应力 CFRP 加固试件在冻融侵蚀作用下的退化要较强度为 C30 的加固试件显著。

关键词: 预应力; 碳纤维增强聚合物板; 加固; 钢筋混凝土梁; 冻融循环

中图分类号: TU378 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-022

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)是一种新型的结构加固材料, 由于具有高强的抗拉性能, 以及良好的耐久性能而在土木工程加固技术领域得到了广泛使用。但研究表明普通 CFRP 加固混凝土结构时, 其高强的抗拉性能仅在受拉钢筋屈服后才有约 20% 得到了利用^[1]。因此, 预应力被引入 CFRP 加固, 从而能较充分发挥 CFRP 的抗拉强度, 并使加固结构拥有更好的工作性能。近年来, 预应力 CFRP 加固钢筋混凝土结构的性能研究一直是 FRP 土木工程应用领域的重要研究方向之一^[2-4]。

除力学性能外, FRP 加固结构的耐久性能也是研究人员十分关心的问题。针对 FRP 材料开展的研究表明: FRP 尤其 CFRP 拥有良好的稳定性和耐久性能, 酸碱盐和干湿、冻融等各种侵蚀性环境作用对其的影响较小。此外, 国内外学者也对 FRP 加固混凝土结构的耐久性进行了大量研究。黄培彦等^[5]系统讨论了 FRP 加固钢筋混凝土构件在湿热环境下耐久性能的试验方法。Almusallam^[6]研究了不同侵蚀环境对 FRP 加固混凝土梁受力性能的影响, 发现经过不同环境侵蚀 6~24 个月后试件的混凝土抗压强度和抗弯刚度均有所降低。冻融环境作用下的 FRP 加固结构耐久性能是相关领域研究中的重点,

^{*} 收稿日期: 2014-02-08; 修订日期: 2014-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008036), 交通部应用基础研究项目(2010 318 000 006), 长沙市科技计划项目(K1203038-11)

通讯作者: 张克波(1961—), 教授, 博士, 主要从事桥梁结构耐久性能分析与承载力评定研究。E-mail: zhangkblyx@vip.sina.com

管巧艳等^[7]采用面内剪切试验研究 CFRP 与混凝土的粘结性能,发现经过 200 次冻融循环后混凝土的抗压强度下降了 11%,破坏界面由混凝土剥离表层破坏转变为粘结界面剥离破坏。任慧韬等^[8]和陈建伟等^[9]同样发现冻融循环造成了 FRP 加固的钢筋混凝土梁的性能退化。李杉^[10]研究了冻融循环、干湿交替和湿热等不利环境与荷载共同作用对 CFRP 与混凝土粘结性能的影响,发现界面断裂能、峰值剪应力等均随着腐蚀天数增加和荷载增大而降低。Karbhari 等^[11]发现试件的抗弯刚度随着冻融循环次数的增加而逐渐降低,GFRP 加固混凝土梁受冻融的影响更加明显。Subramanian^[12]通过对 CFRP-混凝土做冻融循环试验后发现,CFRP-混凝土试件的破坏均发生在混凝土表层,破坏后 FRP 板上粘附有粒径较小的混凝土颗粒,而且随着冻融次数的增加,FRP 板上粘附的混凝土越来越少。Wu 等^[13]通过单剪试验研究了不同冻融循环次数对 FRP-混凝土试件的影响,试验结果显示:随着冻融循环次数的增加,所有试件的破坏均发生在混凝土表层,作者认为主要是因为冻融导致混凝土强度降低所致。Green 等^[14, 15]的研究结果显示:冻融 50、150 以及 300 次时试件的极限承载能力分别增加了 36%、53% 和 54%,破坏模式则逐渐由混凝土内聚破坏向树脂-混凝土层转移;而 Mukhopadhyaya 等^[16]也在研究中也发现了同样的现象和规律。Pedersen 等^[17]发现冻融循环对 CFRP-混凝土试件没有较大影响,Dohnálek 等^[18]甚至提出经受冻融循环后部分试件的极限承载能力有所提高,并认为这主要是因为随着冻融次数的增加,混凝土水浴得到二次养护而致使其强度增加。王苏岩^[19]则在试验中发现在 200 次冻融循环次数内,混凝土的抗压强度出现不同程度的增加,作者认为随着混凝土强度的提高,水环境引起的自愈作用更加明显。Nollet 等^[20]发现经受冻融环境的侵蚀后,混凝土梁的抗弯承载能力提高了 35%。Mata 等^[21]通过冻融循环后的 CFRP-混凝土拉拔试验发现:冻融 12 个月后试件的平均破坏荷载相比 6 个月时增加了 8%,而且试件的破坏界面逐渐由混凝土薄层向粘结剂发展,作者认为冻融循环后混凝土的强度对试件的破坏模式有较大影响。

总体而言,虽然围绕 FRP 加固混凝土结构在冻融条件下的耐久性已有不少工作,但研究结论尚有分歧,预应力 FRP 加固混凝土结构的冻融耐久性则鲜有报道。鉴于此,本文进行了冻融循环作用下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土受弯构件的耐久性试验研究,以考察预应力 CFRP 加固试件在经历冻融循环作用后的性能变化规律,分析不同 CFRP 预应力水平、混凝土强度等级及冻融循环次数等因素对加固试件抗冻耐久性的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

本文试验所用 CFRP 板材采用 SIKA 公司生产的 S512 型,厚度为 1.2mm,宽度为 50mm。粘结剂采用 SIKA 公司生产的环氧树脂胶,型号为 Sikadur®-30。具体参数见表 1 所示。

表 1 试验材料性能
Tab. 1 Properties of CFRP and epoxy

材料类型	拉伸强度(MPa)	拉伸模量(MPa)	剪切强度(MPa)
CarboDur® S512 型碳纤维板	3100	165000	—
Sikadur®-30 型树脂	24~27	11200	14~17

说明:树脂材料性能为+15℃条件下固化 7 天所达到的性能。

1.2 试件设计与构造

根据研究内容及冻融试验设备的尺寸,本文试验共制作了 12 根钢筋混凝土简支梁试件。试验梁的尺寸均为 1000mm×100mm×150mm,计算跨径为 900mm。试验中,试件混凝土设计强度分别为 C30 和 C60,同一混凝土强度的试件一次性浇筑,28 天立方体抗压强度试验显示,C30 混凝土实际强度为 31.65MPa,C60 混凝土实际强度为 66.92MPa。受拉主筋和架立筋均为 2Φ8,箍筋为 1×Φ6@60+10×Φ6@80+1×Φ6@60。试验梁的具体尺寸与配筋信息如图 1 所示。本文试验中钢筋混凝土梁试件的预应力 CFRP 加固采用了课题组自主研发的专用张拉机具和锚具,为防止释放预应力时 CFRP 板粘结端

部的应力过大而发生 CFRP 与混凝土的剥离破坏,在 CFRP 板的两粘结端部各粘贴了一条 50mm 宽、0.167mm 厚的 300g 碳纤维布 U 型箍作为端部锚固,具体如图 1 所示。待粘结树脂固化达到强度后对 CFRP 板放张,并去掉梁端部多余的 CFRP 板。

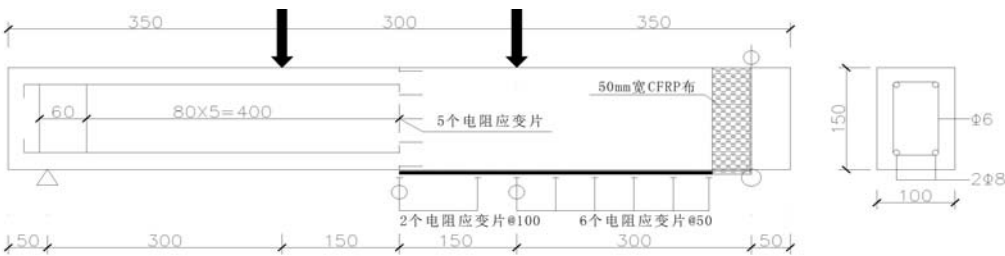


图 1 试件设计与量测方案(单位:mm)

Fig. 1 Design of specimens and disposal of instruments

1.3 试验参数

本文试验主要考察冻融循环次数、混凝土强度和 CFRP 板预应力水平等三个因素对加固试件耐久性的影响,试验参数设计和试件编号如表 2 所示。其中如 1.2 节所述,在试件端部仅采用了碳纤维布 U 形箍而不是永久机械锚具对预应力 CFRP 板进行锚固,所以无法对 CFRP 板施加太大的预应力(U 形箍无法承受),预应力水平分别为 200MPa 和 400MPa。

表 2 试验参数设计

Tab. 2 The test parameters

试件编号	冻融循环次数	预应力水平(MPa)	混凝土强度(MPa)
C30-NP-0	0	0	30
C30-NP-50	50	200	30
C30-NP-100	100	400	30
C30-0.5P-0	0	0	30
C30-0.5P-50	50	50	30
C30-0.5P-100	100	100	30
C30-P-0	0	0	30
C30-P-50	50	50	30
C30-P-100	100	100	30
C60-P-0	0	0	60
C60-P-50	50	50	60
C60-P-100	100	100	60

说明:试件编号中,“C”后数字代表混凝土强度等级,“NP”代表无初始应力,“0.5P”代表初始应力为 200MPa,“P”代表初始应力为 400MPa,最后数字代表冻融次数。

1.4 冻融及量测布置

本文试验参照 ASTM C 666/C 666M—03《混凝土抗速冻和速融的标准实验方法》快速冻融法中的气冻水融法进行冻融循环试验,每次冻融循环时间 4 小时,控制试件中心温度分别为 $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $4\pm 2^{\circ}\text{C}$,冻融次数分别为 0 次、50 次以及 100 次。荷载试验均采用四点弯曲加载,荷载布置如图 1 所示。在试件的跨中、支座及加载点处各布置数显百分表以测量试件全长的挠曲变形。同时,采用电阻应变片分别量测跨中截面的混凝土、钢筋以及沿粘结长度的 CFRP 应变,混凝土采用 $100\text{mm}\times 3\text{mm}$ 应变片,钢筋与 CFRP 采用 $5\text{mm}\times 3\text{mm}$ 应变片,应变片及位移计的布置如图 1 所示。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

表 3 列出了各试件经历冻融循环后静载试验的主要试验结果,其中试件 C30-NP-100 在最终发生斜截面破坏之前没有出现界面剥离,因此剥离荷载为空白。

表 3 主要试验结果
Tab. 3 The test results

试件编号	冻融循环次数	预应力水平(MPa)	开裂荷载(kN)	剥离荷载(kN)	极限荷载(kN)	破坏形态
C30-NP-0	0	0	14	50	57	混凝土保护层剥落
C30-NP-50	50	200	12	47	55	保护层剥落+树脂-混凝土剥离
C30-NP-100	100	400	13	—	54	斜截面破坏
C30-0.5P-0	0	0	28	36	45	混凝土保护层剥落
C30-0.5P-50	50	50	22	36	42	混凝土保护层剥落
C30-0.5P-100	100	100	18	34	41	保护层剥落+树脂-混凝土剥离
C30-P-0	0	0	32	46	52	混凝土保护层剥落
C30-P-50	50	50	24	41	45	保护层剥落+树脂-混凝土剥离
C30-P-100	100	100	20	30	42	树脂-混凝土剥离
C60-P-0	0	0	34	50	68	混凝土保护层剥落
C60-P-50	50	50	30	44	53	树脂-混凝土剥离
C60-P-100	100	100	22	36	43	FRP-树脂剥离

从试验结果可以看出,由于仅在 CFRP 板端部设置了碳纤维布 U 形箍,试件的破坏模式以粘结剥离破坏为主,未发生受压区混凝土的压碎破坏。随着冻融次数的增加以及预应力水平的提高,试件的破坏模式发生了显著的变化,从不受环境作用时混凝土保护层的内聚破坏转变为经冻融侵蚀后的粘结界面剥离破坏,与 Mukhopadhyaya 等^[16]观察的现象相似。

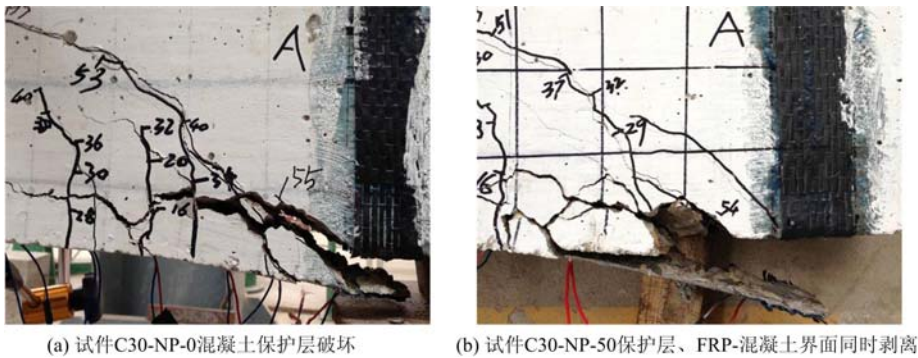


图 2 C30-NP 系列试件主要破坏特征

Fig. 2 The failure mode of specimens C30-NP

未经历冻融循环作用时,试件 C30-NP-0 的破坏模式为混凝土保护层剥离,如图 2(a)所示,破坏后 CFRP 板与混凝土的粘结界面未出现剥离迹象。经历 50 次冻融循环后,试件 C30-NP-50 的破坏模式转变为混凝土保护层剥落伴随着胶层与混凝土的粘结界面剥离,如图 2(b)所示,CFRP 板上粘有大量的混凝土粗骨料,这说明了胶层与混凝土的粘结强度受到了冻融侵蚀的影响,该界面粘结剪切强度下降。随着冻融次数的增加,C30-NP-100 发生了弯剪段的剪压破坏,这应是由于经过 100 次冻融循环后试件混凝土产生了严重损伤和性能退化,导致截面抗剪强度弱于抗弯能力^[22]。

如图 3(a)所示,CFRP 板预应力水平较低(200MPa)的 C30-0.5P 系列试件其破坏模式与 C30-NP 系列试件较为相似,同样由混凝土保护层剥离转变为保护层剥离与树脂-混凝土剥离伴生的破坏形态。但当 CFRP 的预应力水平提高到 400MPa 时,加固试件的破坏模式发生了显著变化:C30-P-0 仍发生以混凝土保护层剥离为主的破坏,但 CFRP-混凝土界面也出现剥离(图 3(b));试件 C30-P-50 与 C30-P-100 的破坏形态均为树脂-混凝土剥离,但冻融 50 次的 C30-P-50 破坏后,CFRP 板上的胶层粘有大量的混凝土颗粒和部分粗骨料,混凝土界面凹凸不平(图 3(c));冻融 100 次的试件 C30-P-100 破坏后,两个界面都比较平整,树脂表面附有少量混凝土(图 3(d))。

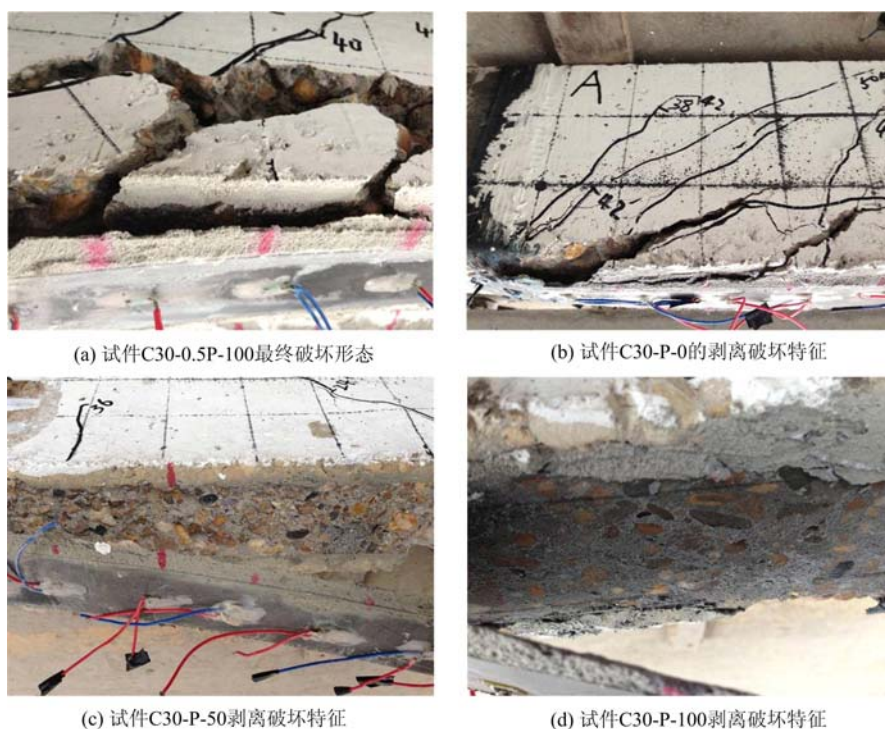


图 3 C30-0.5P 和 C30-P 系列试件破坏形态

Fig. 3 The failure mode of specimens C30-0.5P and C30-P

前述试件的破坏多发生在混凝土部分,表明冻融环境作用下混凝土成为预应力 CFRP 加固结构的薄弱环节。C60-P 系列试件提高了混凝土强度,冻融 50 次后试件 C60-P-50 仍发生了树脂-混凝土的剥离破坏,如图 4(a)所示,其破坏形态与试件 C30-P-100 相似;而冻融 100 次的试件 C60-P-100 其破坏模式则转变为 CFRP 板-树脂剥离破坏,破坏界面非常平整,如图 4(b)所示。由此可以看出,当混凝土力学性能得到提高后,一定强度的冻融环境作用下,FRP-树脂界面的劣化超过了混凝土材料的退化,因此加固构件的薄弱环节转移到了 FRP-树脂的粘结界面。

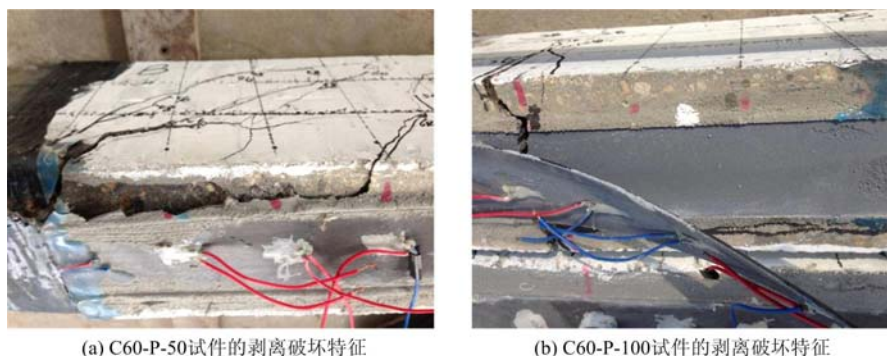


图 4 C60-P 系列试件破坏形态

Fig. 4 The failure mode of specimens C60-P

2.2 试件承载性能

图 5、图 6 描绘了各系列试件在冻融环境作用下的开裂荷载、极限荷载等承载能力的变化。由图 5 可以看到,随着冻融次数的增加,各系列试件的开裂荷载整体上均呈下降趋势,这说明随着冻融作用增强试件所受的损伤更为显著。并且,预应力 FRP 加固试件的开裂荷载较非预应力加固试件的下降速度更快,似乎冻融循环作用对预应力加固试件的影响比非预应力加固试件要大,这有可能是冻融循环作用对粘结界面产生了不利影响,使得试件在冻融过程中预应力有一定的损失,作者将开展进一步工作予以研究。冻融循环作用下 C30-NP 系列试件的开裂荷载变化不大,该系列试件因 CFRP 板未施加预应力而导致开裂荷载值较小,冻融循环作用虽然对试件产生了不利影响,但应是由于试件材料强度的差异和离散性淹没了冻融效应,使得 C30-NP-100 试件的开裂荷载略高于试件 C30-NP-50 的开裂荷载。另外,混凝土强度等级为 C60 的试件其开裂荷载普遍高于 C30 试件的开裂荷载,这除了由于 C60 混凝土的抗拉强度高于 C30 的抗拉强度外,另一个可能原因是 C60 混凝土的抗冻性能要比 C30 混凝土好。

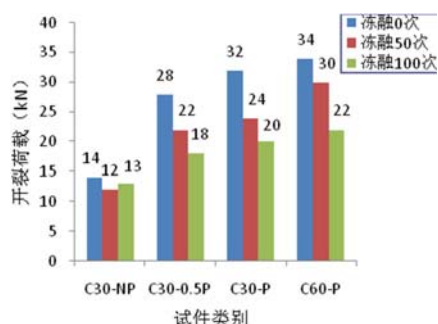


图 5 各试件开裂荷载随冻融次数变化对比图

Fig. 5 The effect of freeze-thaw cycling on cracking loads

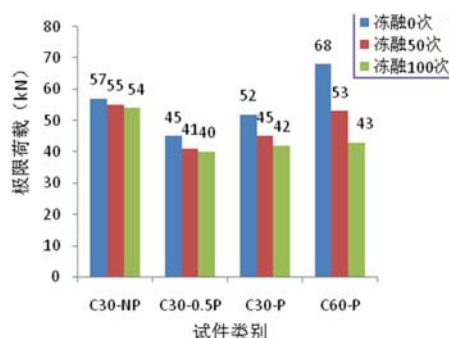


图 6 各试件极限荷载随冻融次数变化对比图

Fig. 6 The effect of freeze-thaw cycling on ultimate loads

图 6 给出了各试件最终破坏时的极限荷载,从图 6 可以看出未经冻融循环作用时,随着预应力水平的提高,C30-NP-0、C30-0.5P-0、C30-P-0 等 C30 系列未经冻融试件的极限承载力相差不大,这是因为在未对 CFRP 板设置强有力锚固的条件下,各试件的破坏模式均为混凝土保护层剥落,试件承载能力主要取决于混凝土抗拉强度,因此极限荷载差异较小;试件 C60-P-0 的极限荷载(68kN)显著高于 C30 系列各试件,也是这个原因。另一方面,随着冻融次数的增加,各系列试件的极限荷载都有不同程度的下降,这可能主要是由于两个方面的原因:(1)C30 系列试件的混凝土经过冻融循环作用后力学性能有所降低,大量研究已经证明了这一点;(2)冻融对 CFRP-混凝土界面粘结性能有不利影响,使 CFRP 加固效果降低。对比各组试件的极限荷载可知,C60-P 系列试件的极限荷载退化要显著大于 C30 各系列,这是由于经历冻融循环后 C60 试件的薄弱环节迁移,破坏模式不再由试件混凝土性能控制,因此混凝土强度增大对试件承载性能的贡献消失,高强混凝土试件的极限荷载遂降至接近普通混凝土试件的水平。另外,冻融循环作用下预应力 FRP 加固试件的极限荷载降低程度要大于非预应力加固试件,试件 C30-NP-100 的极限荷载较 C30-NP-0 降低 5.3%,试件 C30-0.5P-100 的极限荷载较 C30-0.5P-0 降低 11.1%,而试件 C30-P-100 较 C30-P-0 降低了 19.2%,表明冻融循环作用对预应力加固试件的整体不利影响似乎要大于非预应力试件。

2.3 试件抗弯刚度

图 7~图 10 为各系列试件在冻融环境作用下的荷载—挠度曲线图。由图 7 可以看出,未施加预应力时,冻融环境作用下各试件的荷载—挠度曲线非常接近,而且曲线均大致呈线性增长趋势,这主要是因为未施加预应力时,在破坏之前 CFRP 板与混凝土粘结良好,一直处于弹性工作状态,而且 CFRP 板是线弹性材料,一旦试件端部锚固破坏,CFRP 板随即退出工作。图 8 为较低水平预应力试件(200MPa)经冻融循环作用后的荷载—挠度曲线图,从图中可看出 C30-0.5P 系列试件的开裂荷载要大于 C30-NP 系列试件,而随着冻融次数的增加,开裂后不同冻融次数试件的曲线斜率出现差异,似乎对

试件施加一定预应力后,冻融循环作用对试件的抗弯刚度产生了一定的影响。

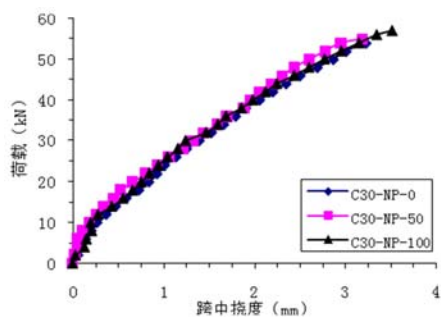


图 7 C30-NP 系列试件荷载—挠度曲线

Fig. 7 The loads versus deflection curves of specimens C30-NP

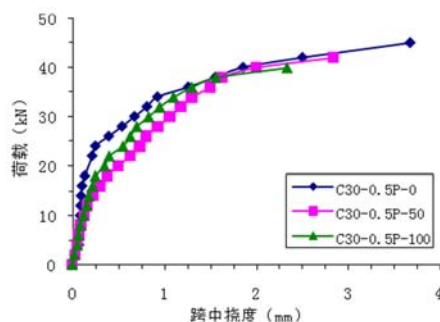


图 8 C30-0.5P 系列试件荷载—挠度曲线

Fig. 8 The loads versus deflection curves of specimens C30-0.5P

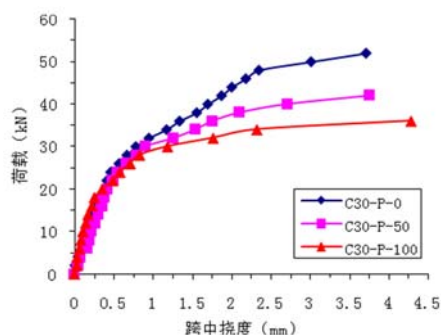


图 9 C30-P 系列试件荷载—挠度曲线

Fig. 9 The loads versus deflection curves of specimens C30-P

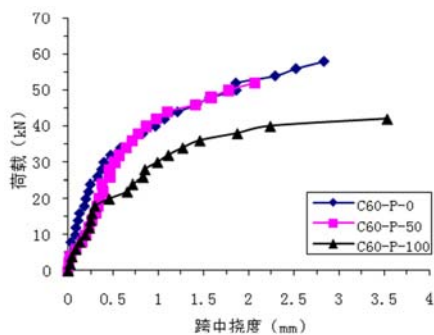


图 10 C60-P 系列试件荷载—挠度曲线

Fig. 10 The loads versus deflection curves of specimens C60-P

图 9 为 C30-P 系列试件在冻融环境作用下的荷载—挠度曲线图。从图中可以看出,随着冻融次数的增加,加固试件的开裂荷载逐渐下降,而且当荷载增加时,冻融次数多的试件挠度增长较快。此外,从图 9、10 可看出,在其它参数相同时,冻融次数增加导致试件荷载—挠度曲线的斜率显著减小,反映出冻融循环对预应力 CFRP 加固试件的退化效应;另一方面,从试件 C30-NP 到 C30-0.5P 再到 C30-P,不同冻融循环次数对应的曲线间的间隔逐渐增大,表明随着 CFRP 板预应力水平的提高,冻融循环次数增加导致的加固试件刚度差异逐渐显著,似乎冻融循环作用对预应力加固试件的整体不利影响要大于非预应力试件,而且随着预应力的增加,这种不利影响会逐渐加剧。

3 结论

(1) 经过冻融循环作用后,加固试件包括开裂和极限荷载在内的承载性能都有了不同程度的下降,冻融侵蚀对 CFRP 加固的混凝土结构产生了明显的不利影响,这可能主要是由于两个方面的原因:①冻融循环作用下混凝土强度降低,②CFRP-混凝土界面粘结性能退化。

(2) 随着冻融循环次数的增加,加固试件的破坏模式逐渐由混凝土保护层剥离转变为树脂-混凝土和 CFRP-树脂的界面剥离破坏,表明冻融环境对粘结界面的劣化速率要大于其对混凝土强度的退化速率。

(3) 冻融循环作用对预应力加固试件的整体不利影响要大于非预应力试件,而且随着预应力的增加,这种不利影响逐渐加剧。

(4) 虽然较高强度混凝土的抗冻性好于普通混凝土,冻融循环作用下 C60 试件的退化较 C30 试件更为显著,这应是由于冻融作用下加固试件的薄弱环节由混凝土强度迁移至 CFRP-树脂界面,试件受

力性能不再取决于混凝土性能。

参考文献:

- [1] Motavalli Masoud, Czaderski Christoph, Pfyl-Lang Kerstin. Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Recent Developments at EPMA, Switzerland[J]. Journal of Composites for construction, 2011, 15(2):194—205.
- [2] Wight R G, Green M F, Erki M-A. Prestressed FRP Sheets for Poststrengthening Reinforced Concrete Beams [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(4):214—220.
- [3] El-Hacha R, Wight R G, Green M F. Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures[J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(1):3—13.
- [4] Kotynia R, Walendziak R, Stoecklin I, Meier U. RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cyclic Loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(2):168—180.
- [5] 黄培彦, 周昊, 郑小红 等. 湿热环境下 FRP 加固 RC 构件耐久性实验方法研究[J]. 实验力学, 2011, 26(5):603—610 (HUANG Peiyan, ZHOU Hao, ZHENG Xiaohong, et al. On the Experimental Method for Durability Measurement of RC Members Strengthened with FRP Served in Hot and Humid Environments[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):603—610 (in Chinese))
- [6] Tarek H Almusallam. Load-deflection Behavior of RC Beams Strengthened with GFRP Sheets Subjected to Different Environmental Conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(10):879—889.
- [7] 管巧艳, 高丹盈, 李杉. 冻融循环作用后 CFRP 与混凝土粘结性能研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(6):9—12 (Guan Qiaoyan, Gao Danying, Li Shan. Study on CFRP-concrete Bond Behavior Subjected to Freeze-thaw Cycles [J]. Industrial Construction, 2010, 40(6):9—12 (in Chinese))
- [8] 任慧韬, 胡安妮, 赵国藩. 冻融循环对玻璃纤维布加固混凝土梁受力性能影响[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4):104—110 (REN Huitao, HU Anni, ZHAO Guofan. The Influence of Freeze-thaw Action on Behavior of Concrete Beams Strengthened by Glass Fiber Reinforced Plastics[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4):104—110(in Chinese))
- [9] 陈建伟, 胡海涛, 王希宾 等. 玄武岩纤维加固混凝土梁的冻融试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(3):27—30 (CHEN Jianwei, HU Haitao, WANG Xibin, et al. Experiment with the Freeze-thaw of the Concrete Beams Reinforced by BF[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(3):27—30(in Chinese))
- [10] 李杉. 环境与荷载共同作用下 FRP 加固混凝土耐久性[D]. 大连理工大学结构工程系(博士论文), 2009 (LI Shan. Durability of Concrete Strengthened with FRP under Environmental and Loading Conditions[D]. Doctor Thesis of Dalian University of Technology, 2009(in Chinese))
- [11] Karbhari V M, Engineer M. Effect of Environmental Exposure on the External Strengthening of Concrete with Composites-short Term bond Durability[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15(2):1194—1216.
- [12] Kolluru V Subramaniam. Freeze-thaw Degradation of FRP-concrete Interface: Impact on Cohesive Fracture Response[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13):3924—3940.
- [13] Yufei Wu, Yunchun Yun. Durability of CFRP-concrete Joints under Freeze-thaw Cycling[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(3):401—412.
- [14] Green M F. Effect of Freeze-thaw Cycles on the Bond Durability between Fiber Reinforced Polymer Plate Reinforce Reinforcement and Concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5):949—959.
- [15] Green M F, Soudki K A, Johnson M M. Freeze-thaw Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fibre Reinforced Plastic Sheets[C]. Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering, Sherbrooke, 1997.
- [16] Mukhopadhyaya P, Swamy R N, Lynsdale C J. Influence of Aggressive Exposure Conditions on the Behaviour of Adhesive Bonded Concrete-GFRP Joints[J]. Construction and Building Materials, 1998, 18(12):427—446.
- [17] Arntsen B, Pedersen V. Freeze-thaw Durability of Concrete Beams Strengthened with CFRP[C]//In: Proceedings of Eighth International Conference on Structural Faults Repairs-99, London, 1999.
- [18] Dohnálek P. Environmental Durability of FRP Bond to Concrete Subjected to Freeze-Thaw Action[D]. Master

Thesis of Massachusetts Institute of Technology, 2006:46—49.

- [19] 王苏岩, 尹晓明, 刘林. 冻融环境下 CFRP-高强混凝土抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(增刊):176—180 (WANG Suyan, YING Xiaoming, LIU Lin. Experimental Research on Shear Behavior of High Strength Concrete Strengthened with Cfrp in Frost Environment[J]. Journal of Building Structures, 2008(S):176—180(in Chinese))
- [20] Nollet M J, Perraton D, Chaallal O. Flexural Behavior of CFRP Strengthened RC Beams under Room and Freezing Temperatures[C]//In:Proceedings of Eighth International Conference on Structural Faults Repairs-99, London, 1999:7.
- [21] Oscar R Mata, Rebecca A, Atadero M. ASCE. Evaluation of Pull-Off Tests as a FRP-Concrete Bond Testing Method in the Laboratory and Field[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2014, 19(2): 04014001-1-8.
- [22] Jiawei Shi, Hong Zhu, Zhishen Wu. Bond Behavior between Basalt Fiber-Reinforced Polymer Sheet and Concrete Substrate under the Coupled Effects of Freeze-thaw Cycling and Sustained Load[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(4):530—542.

Durability Study of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Prestressed CFRP Plate Under Freeze-thaw Cycling

PENG Hui^{1,2}, WANG Hao³, FU Jun-jun¹, LI Zhi-bing⁴, ZHANG Ke-bo^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. Sichuan Angu Civil Engineering Limited Corporation, Chengdu 610036, Sichuan, China; 4. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: Reinforced concrete structure strengthening technique by using prestressed CFRP laminates is applied more and more extensively in bridge strengthening due to its significant advantages. A total of 12 reinforced concrete beams were manufactured first, a part of which were strengthened with prestressed CFRP plate and the remains with non-prestressed CFRP plate, then experimental study of specimen's durability under freeze-thaw cycling was conducted. The failure mode and load-carrying capacity of the beams subjected to different freeze-thaw cycling times were investigated, and the influences of concrete strength, CFRP initial stress level and the freeze-thaw cycling number on the load-carrying behavior of the strengthened specimens were analyzed. Experimental results show that the cracking load and ultimate load of specimen decrease after freeze-thaw cycling, which indicates that freeze-thaw cycling weakens the load-carrying capacity of strengthened beams. With the increase of freeze-thaw cycling number, the failure mode of specimen transforms from peeling off the protective layer of concrete to debonding of interface between CFRP plate and concrete. The negative effect of freeze-thaw cycling on the beams strengthened with prestressed CFRP seems more significant than that of the beams strengthened with non-prestressed plate. The degradation of specimens with concrete strength of C60 under freeze-thaw cycling is more significant than that of specimens with concrete strength C30.

Keywords: prestress; carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plate; strengthening; reinforced concrete beam; freeze-thaw cycling