

复杂环境下 CFRP 加固高强混凝土梁 力学性能研究

王苏岩,刘振杰,张红涛,朱方芳

(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 目的 研究持续荷载、冻融循环、干湿交替共同作用下碳纤维增强复合材料(CFRP)加固高强混凝土梁的抗弯性能和退化规律.方法 利用自制的持载设备给加固梁施加持续荷载并经过冻融和干湿腐蚀后,通过四点弯曲破坏试验分析持载等级、冻融次数及干湿次数对试验梁耐久性的影响.结果 相较于参照梁,环境作用后的试件的开裂荷载与剥离荷载都有了不同程度的下降.冻融、干湿耦合条件下的试验梁的承载性能弱于只有持续荷载作用时的试验梁,持载、冻融、干湿共同作用时梁的剥离荷载变得更低.经过长时间的复杂环境作用,试验梁的极限挠度变化规律不明显,发生剥离时对应的挠度逐渐减小.结论 冻融与干湿耦合作用下,试验梁的力学性能发生了退化,持续荷载的存在进一步加剧了试验梁的损伤程度.

关键词 CFRP;冻融循环;干湿交替;持续荷载;钢筋混凝土梁;高强混凝土;耐久性

中图分类号 TU375.1 文献标志码 A

Research on Mechanical Behavior of High Strength Concrete Beams Strengthened with CFRP under Complex Environmental Conditions

WANG Suyan, LIU Zhenjie, ZHANG Hongtao, ZHU Fangfang

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

Abstract: This paper mainly studies the flexural performance and deterioration law of CFRP-high strength reinforced concrete beams under coupling effect of sustained loading, freeze-thaw cycling and dry-wet cycling. After being applied the sustained loading by the home-made device and successively subjected to freeze-thaw cycling and dry-wet cycling, the specimens are tested by four-point bending method to analyze the effects of loading level, the number of freeze-thaw cycling and the number of dry-wet cycling on the durability of reinforced beams. Both cracking loads and debonding loads of specimens under different environment degrade to different extents compared with the control specimen. The flexural performance of test beams under coupling effect of freeze-

收稿日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51378089)

作者简介:王苏岩(1958—),女,教授,主要从事 FRP 加固混凝土结构耐久性方面研究.

thaw cycling and dry-wet cycling is lower than that of the test beams only under sustained loading. In addition, the debonding load of specimens is much lower under coupling effect of freeze-thaw and dry-wet environmental conditions as well as sustained loading. After a long time exposure in experiment environment, the change of the ultimate deflection of beams is not significant whereas the deflection at the initial stage of debonding decreases gradually. Results indicate that the mechanical properties of test beams has degraded under the freeze-thaw and dry-wet coupling environment, while the presence of sustain loading further reduces bending capacity of test beams.

Key words: CFRP; freeze-thaw cycles; wet-dry cycles; sustained load; RC beam; high strength concrete; durability

迄今为止,纤维增强复合材料(FRP)作为加固补强材料已被广泛应用到混凝土结构中,由于粘贴加固方式简单易行,故成为主要加固方式之一,而FRP与混凝土牢固黏结是确保粘贴加固有效的关键。在寒冷的沿海地带,海工混凝土结构承受荷载作用的同时,还受到冬季冻害、夏季潮湿等诸多不利因素影响,由此引起工程结构提早破坏的案例比比皆是,恶劣的海洋环境使得FRP-混凝土界面受到严峻考验。Y. J. Kim^[1]和李杉^[2]认为冻融环境对CFRP-混凝土界面产生了不利影响;A. G. Soudki^[3]发现300次干湿循环后CFRP加固梁的极限承载力下降了11%~28%;姚因杰^[4]观察到荷载、冻融、干湿共同作用对加载端CFRP-高强混凝土界面产生了劣化作用。当前关于FRP加固混凝土结构的文献,无论是单/双剪试验研究,还是结构构件研究,多数只考虑1~2种因素的影响^[5-11],三种因素涉及很少,这与实际工程

所处环境尚存在一定的差距。基于此,笔者主要研究包括持续荷载、冻融循环及干湿交替,分析CFRP加固高强混凝土梁在不同环境耦合作用下抗弯性能劣化规律,提出了环境损伤系数,可对于海岸与近海工程的长期使用提供技术支持。

1 试验概况

1.1 材料参数

混凝土强度等级为C60,配合比详见表1,其中粉煤灰等级为一级,水泥型号为PⅡ52.5R,碎石粒径介于5~10 mm。经28 d标准养护,测得混凝土立方体(150 mm×150 mm×150 mm)抗压强度为67.7 MPa。CFRP采用日本东丽I300碳纤维布,材料性能见表2。底涂胶和浸渍胶购自大连凯华公司,底涂胶与混凝土的正拉粘结强度不小于2.5 MPa,浸渍胶抗拉、抗压、抗弯强度及弹性模量依次为40 MPa、75 MPa、55 MPa、2 500 MPa。

表1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete

掺量/(kg·m ⁻³)						水胶比
水	水泥	粉煤灰	砂	石子	减水剂	
145	396	62	641	1 245	6	0.317

表2 碳纤维布材料性能

Table 2 Properties of carbon fiber sheet

抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	名义厚度/ mm	体积质量/ (g·m ⁻³)
3 624	2.4×10 ⁵	0.167	300

1.2 试验梁制作与量测

试验中共制作了15根钢筋混凝土梁,受冻融试验机尺寸和干湿养护室空间限制,所有试件尺寸均为900 mm×80 mm×120 mm,净跨为800 mm。梁内受拉主筋与箍筋均采用HRB400,架立筋采用HPB300。经

过 28 天养护,在试验梁底部粘贴 2 层尺寸为 760 mm × 70 mm 的 CFRP 布,并在 CFRP 布

两端分别粘贴 70 mm 宽 U 型箍进行加固, CFRP 加固梁如图 1 所示。

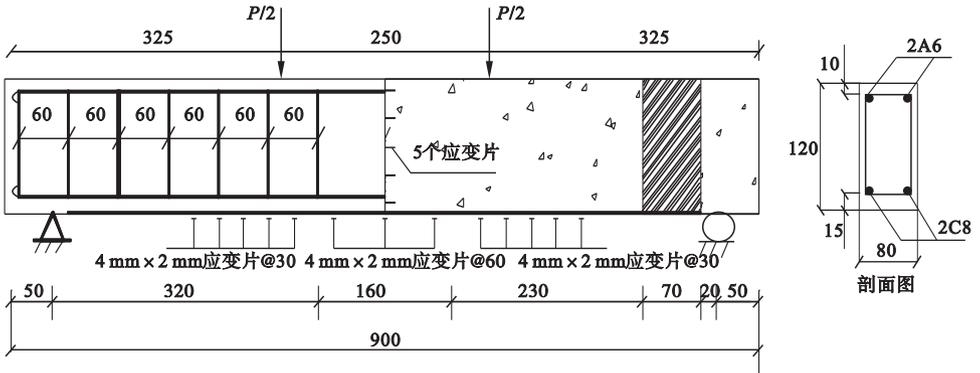


图 1 加固梁设计与量测方案

Fig. 1 Design of reinforced beams and measurement plan

通过 1 000 kN 的电液伺服万能试验机,对试验梁进行四点弯曲试验,加载速率为 0.2 mm/min,采用德国 IMC 数据采集系统收集数据,采集频率为 5 samples/s. 具体采集数据包括:①荷载数值;②试验梁跨中挠度变化;③梁底 CFRP 布、加固梁侧面及受拉主筋跨中位置的应变。

300 次。

1.3 持续荷载和侵蚀环境

试验中采用螺栓加载方式,由自主设计的加载装置施加持续荷载,如图 2 所示. 持续荷载共设 3 个等级,分别是未加固梁极限承载力的 0% (0 kN)、30% (10 kN) 及 60% (20 kN). 在试件底部与持载装置底板缝隙间靠近传力杆位置分别放置夹式引伸计,采用电液伺服万能试验机对试验梁加载至预定荷载,记录夹式引伸计示数,卸载并通过拧紧螺栓使得再次读取的夹式引伸计读数与记录值相等,至此持续荷载施加完成。

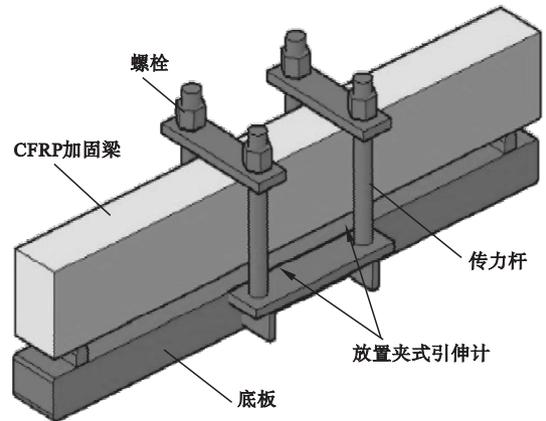


图 2 持载装置设计

Fig. 2 Design of sustained loading set-up

干湿交替试验在干湿养护室中进行,设定温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度控制在 $(50 \pm 5)\%$. 一次干湿循环时间为 24 h,包括 8 h 盐水浸泡,16 h 干燥,为保证试件干燥充分,在试验梁两侧分别设置电风扇加速干燥,干湿循环次数为 45 次及 90 次。

1.4 试件编号

试验环境较为复杂,包括持续荷载单因素作用、冻融与干湿双因素耦合作用及持载、冻融、干湿三种因素耦合作用. CFRP 加固梁所处环境各不相同,试验参数见于表 3。

侵蚀环境包括冻融循环与干湿交替,两种环境介质均采用 3.5% NaCl 溶液. 先将试验梁置于冻融箱中进行冻融试验,参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009)中的快冻法,一次冻融循环约 3 h,最高温度为 $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$,最低温度为 $(-17 \pm 2)^\circ\text{C}$. 冻融次数为 150 次及

表3 试件参数细节

Table 3 Details of specimens

试件编号	持载等级/kN	冻融次数	干湿次数
FOW0L0	0	0	0
FOW0L1	10	0	0
FOW0L2	20	0	0
F150W45L0	0	150	45
F150W45L1	10	150	45
F150W45L2	20	150	45
F150W90L0	0	150	90
F150W90L1	10	150	90
F150W90L2	20	150	90
F300W45L0	0	300	45
F300W45L1	10	300	45
F300W45L2	20	300	45
F300W90L0	0	300	90
F300W90L1	10	300	90
F300W90L2	20	300	90

注:F表示冻融循环,W表示干湿交替,L表示持续荷载.例如,F150W45L1表示对试验梁施加10 kN的持续荷载,然后依次进行150次冻融循环和45次干湿交替.

2 静力试验结果及分析

2.1 梁试件表面与破坏形态

经过不同环境作用后,各试验梁表面损伤情况如图3所示.冻融150次与300次后,混凝土梁表面砂浆均稍微脱落,冻融300次的试件局部会有粗骨料露出,但从梁整体外观观察发现冻融150次与300次差异不明显.冻融过后的试验梁继续进行干湿试验,经过45次干湿与90次干湿后,试验梁表面损

伤并未加剧,但随着干湿循环次数的增加,试件表面逐渐有盐颗粒析出.

各试验梁破坏过程相似,图4列出部分试验梁的破坏形态.观察发现,加载初期,试验梁跨中位置距离梁底约2~3 cm处首先出现几条裂缝,由于CFRP布对混凝土的约束作用,各条裂缝均是中间较宽,上下两端较窄.随着荷载的增大,不断有新裂缝出现,并沿梁均匀分布,纯弯段裂缝明显宽于弯剪段裂缝.当荷载增至45 kN左右时,两加载点附近裂缝数量逐渐增多,裂缝宽度显著增大,最大裂缝宽度已超出0.2 mm,并不断伴有轻微噼啪声响.整个加载试验中,梁底CFRP布均未被拉断,除FOW0L0试验梁外,梁顶部混凝土也均未被压溃.试件FOW0L0在CFRP剥离前混凝土也并未破坏,加载后期由于梁试件变形过大,超出混凝土的极限压应变,致使纯弯段内混凝土被压碎.试验中CFRP-混凝土界面首次剥离均出现在加载点附近,随后跨中位置也出现剥离,CFRP布沿梁底面与混凝土逐渐分离开来并延伸至U型箍处,伴随“啪”的一声巨响,U型箍被撕裂,试验梁彻底丧失承载能力.加固梁的破坏模式表明CFRP-混凝土界面剥离破坏为CFRP加固梁主要破坏形式,应注意加强防护.

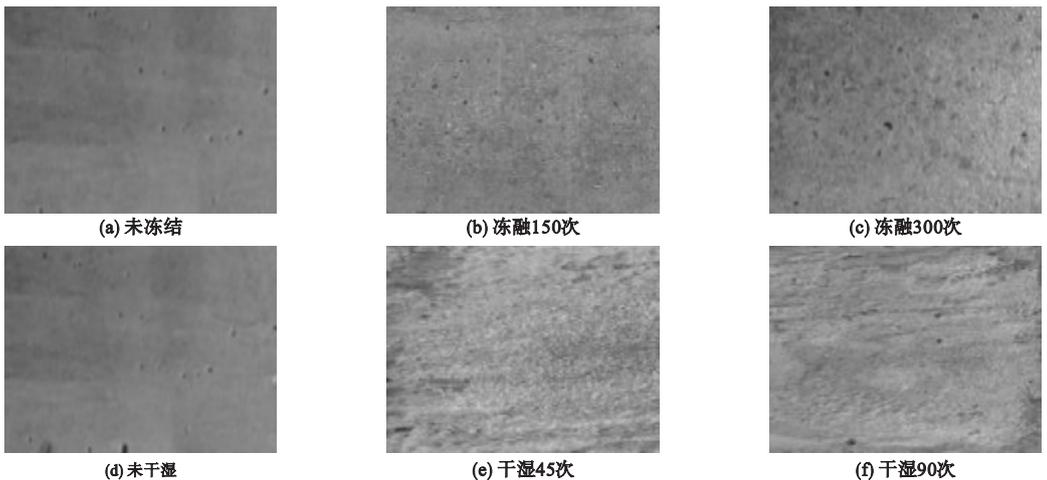


图3 不同环境作用下试件表面剥落情况

Fig. 3 Surface characteristics of beams under different environmental conditions

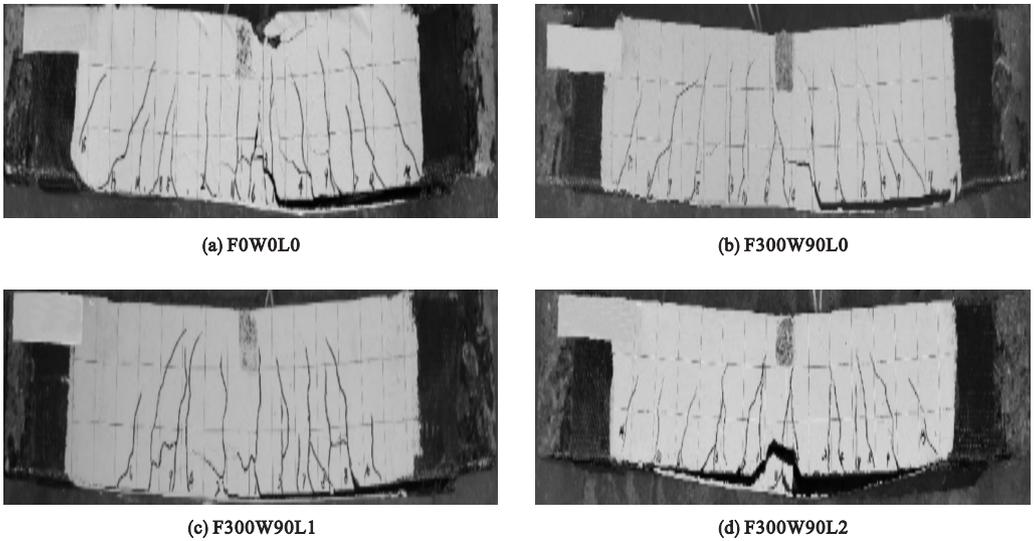


图4 试件的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of specimens

2.2 试验梁的抗力性能

经受不同因素作用后,对试件进行加载破坏,表4列出了各试验梁主要试验结果。

表4 各试验梁的试验结果

Table 4 Test results of beam specimens kN

试件编号	F_{cr}	F_1	F_2	F_3
F0W0L0	13.6	36.8	58.1	62.5
F0W0L1	14.5	35.4	52.2	60.5
F0W0L2	13.4	34.9	49.4	58.6
F150W45L0	13.6	35.5	52.3	58.3
F150W45L1	12.4	34.4	53.4	57.2
F150W45L2	12.6	33.8	53.1	55.8
F150W90L0	13.5	34.1	50.9	54.4
F150W90L1	14.6	33.6	47.5	53.9
F150W90L2	11.7	30.1	48.5	51.7
F300W45L0	12.9	35.7	53.3	57.9
F300W45L1	14.1	34.8	52.9	56.2
F300W45L2	13.6	33.3	50.5	54.7
F300W90L0	13.1	33.6	52.6	54.9
F300W90L1	14.3	32.3	50.8	52.5
F300W90L2	11.1	28.7	48.7	50.9

注: F_{cr} 为开裂荷载; F_1 为出现十条裂缝时的荷载; F_2 为最大裂缝达到0.2 mm时的荷载; F_3 为剥离荷载。

由表4可以发现,冻融、干湿双重因素影响下,CFRP加固梁的开裂荷载和剥离荷载都有了不同程度的下降,且剥离荷载降低幅值较持续荷载单独作用时更显著。经过分析认为原因包括两个方面:①试验梁的承载力主要取决于CFRP与混凝土的黏结强度,持续荷载单独作用时间较短,对CFRP-混凝土

土界面影响较弱;②试验中所配置的高强混凝土并非具有高抗冻性,随着冻融次数的增加,梁内微裂缝含量增多^[12],为干湿循环提供了有利的侵蚀空间。

冻融、干湿次数均相同时,可以看出持续荷载的存在加剧了试验梁的劣化,持载等级越高,劣化程度越显著。由表4可知,试验梁的开裂荷载介于11~15kN,低持载作用时试验梁并未开裂,此时试件力学性能的退化可能是CFRP与混凝土界面间的剪力引起的^[9]。持载等级较高时,试验梁处于带裂缝工作状态,除了CFRP-混凝土界面间剪力的影响,梁中的细小裂缝使得冻融、干湿介质与混凝土、结构胶充分接触,CFRP与混凝土的粘结强度降低,试验梁的力学性能进一步退化。

通过对比冻融循环与干湿交替分别对试验梁的影响发现,干湿试验对试验梁的耐久性影响更为显著。这是因为:①试验的顺序对试验结果存在一定的影响,冻融试验加速了后续干湿试验对梁的侵蚀作用;②虽然冻融次数多于干湿次数,但干湿较冻融试验时间更长;③高强混凝土的水灰比较低,后期水化作用潜力较大,减弱了冻融循环对试件的损伤^[4]。

2.3 变形特征和刚度分析

图5为各试验梁的荷载-挠度曲线图。可见,各试验梁变形特征相似,根据曲线变化形态将曲线分为4个阶段:①弹性阶段;②裂缝开展初期;③裂缝开展后期;④CFRP布剥离阶段。加载初期,CFRP加固梁未出现裂缝,荷载-挠度曲线基本呈线弹性,持载与环境对梁开裂前的刚度几乎没有影响。随着荷载的增大,试验梁由裂缝开展初期阶段过渡至裂缝发展后期阶段,裂缝不断增多增大,最宽裂缝出现在加载点附近,试件刚度逐渐降低,裂缝发展后期试件刚度退化较为显著。由于梁底面胶体粘结强度的不均匀性及裂缝发展的随机性,从出现CFRP布剥离至试件彻底破坏,荷载在剥离荷载上下浮动,荷载-挠度曲线中出现2~5个波浪段。

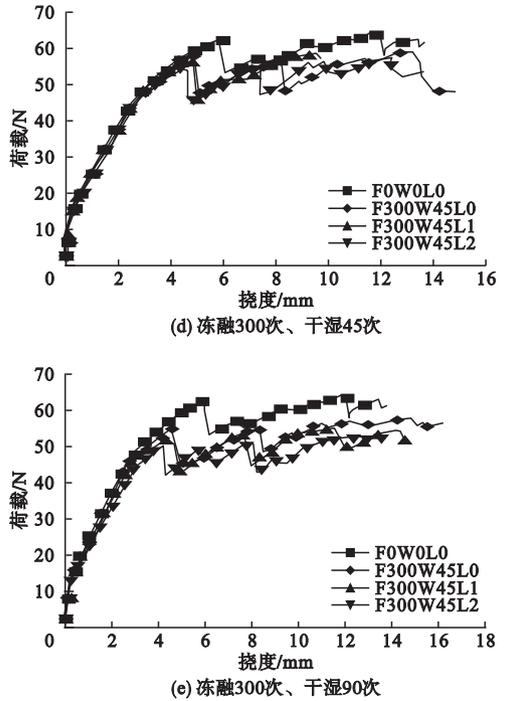
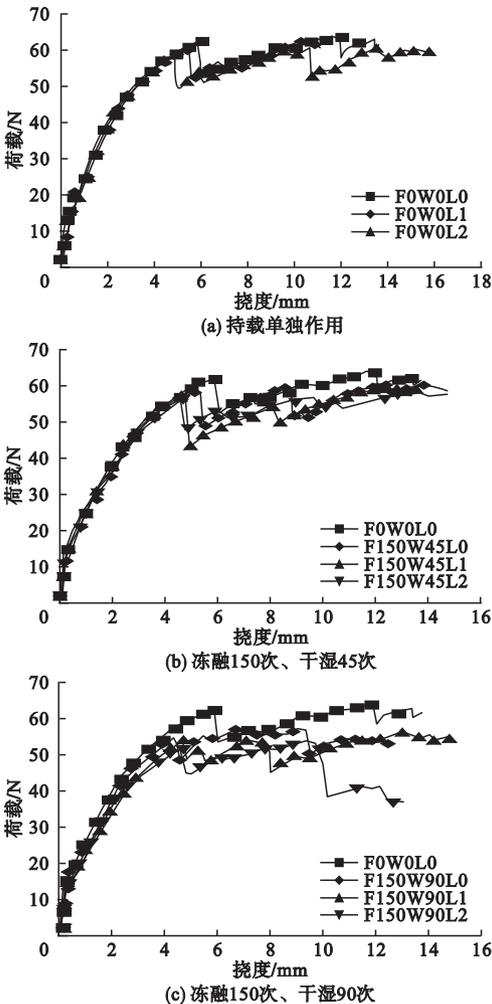


图5 试验梁的荷载挠度曲线

Fig. 5 Load - deflection curve of test beams

由图中荷载-挠度曲线可以看出,在不同因素作用下,试验梁均表现出良好的延性,梁的极限挠度介于12~15 mm。但可以发现,在长期荷载作用下试件剥离时对应的挠度呈降低趋势,持续荷载越大,剥离挠度降低程度越显著。分析认为,试件从出现剥离至彻底破坏存在较长的剥离距离,较长的剥离路径有效地提高了梁的极限变形量。在持载作用下,局部混凝土由于损伤的连续积累受到不利影响,加载后期加载点附近混凝土裂缝开展速率加快引发CFRP布提早剥离,因此剥离时的挠度减小。

持续荷载单独作用及经受150次冻融、45次干湿的试验梁刚度变化不明显,说明CFRP布与混凝土仍粘结紧密,持载单独作用及短期环境作用对CFRP加固梁刚度影响不大。冻融300次、干湿45次后,与参照梁相比,持载等级为L0、L1的试验梁刚度差异不大,持载等级为L2的试验梁在裂缝开展初期刚度并未改变,在裂缝开展后期刚度略有

降低. 如果不考虑试件离散性及混凝土强度退化因素的影响, 这是因为试验梁的刚度主要取决于 CFRP 与混凝土的粘结强度, 高荷载与长时间的冻融作用使得 CFRP - 混凝土界面劣化, 加载后期 CFRP 布对混凝土的约束作用减弱, 裂缝发展加快, 因此试件后期刚度略有降低. 与其他梁对比可见, 90 次干湿循环后的试验梁在相同荷载下挠度增加较明显, 裂缝发展后期刚度退化更加显著. 同时可以看出, 干湿 90 次后, 不同持载等级与冻融次数作用下的试验梁刚度差异不明显, 荷载 - 挠度曲线比较接近. 由此可以推测, 长时间的干湿循环对试验梁的刚度产生了更为严重的不利影响, 这与干湿作用使树脂中分子键的断裂和 CFRP - 混凝土界面薄弱位置受损有着直接的联系^[13].

2.4 剥离承载力理论分析

经过分析, 引入环境损伤系数 η , 采用 Chen and Teng 建议的公式^[14-15]对剥离弯矩进行预测, 计算过程如下.

混凝土受压区域的合力:

$$C = \int_0^{x_{cl}} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^{1.83} \right] b dy + \int_{x_{cl}}^{x_c} f_c b dy. \quad (1)$$

式中: b 为试验梁梁宽; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, $f_c = 27.5 \text{ MPa}$; ε_0 取值为 0.00205; x_{cl} 、 x_c 分别为界面中和轴至压应变为 ε_0 位置处及受压边缘的距离.

CFRP - 混凝土界面受力:

$$F_{cfpr} = \alpha \beta_w \beta_L b_{cfpr} L_e \sqrt{f'_c}, \quad (2)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_{cfpr}/b}{1 + b_{cfpr}/b}}, \quad (3)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1, & L \geq L_e; \\ \sin\left(\frac{\pi L}{2L_e}\right), & L < L_e. \end{cases} \quad (4)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_{cfpr} t_{cfpr}}{\sqrt{f'_c}}}. \quad (5)$$

式中: b_{cfpr} 、 E_{cfpr} 分别为 CFRP 布宽度、弹性模

量; t_{cfpr} 为 2 层 CFRP 布厚, $t_{cfpr} = 0.334 \text{ mm}$; f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度, $f'_c = 49.98 \text{ MPa}$.

引入环境损伤系数:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3. \quad (6)$$

其中, η_1 为持续荷载损伤系数, $\eta_1 = 1 - 0.23n_1/20$, n_1 取值为 0、10、20; η_2 为干湿交替损伤系数, $\eta_2 = 1 - 0.21n_2/300$, n_2 取值为 0、150、300; η_3 为冻融循环损伤系数, $\eta_3 = 1 - 0.24n_3/90$, n_3 取值为 0、45、90.

CFRP 布出现剥离时, 试验梁变形较大, 此时架立筋、纵向受拉筋均已屈服, 因此受力平衡方程为

$$C + f'_y A'_s = f_y A_s + \eta F_{cfpr}, \quad (7)$$

$$M = \int_0^{x_{cl}} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^{1.83} \right] b y dy + \int_{x_{cl}}^{x_c} f_c y b dy + f'_y A'_s (h_0 - a') + \eta F_{cfpr} \cdot a. \quad (8)$$

式中: 依据庞方腾的结论, α 取值为 0.86^[16]; a 为混凝土保护层外边缘至纵向受拉钢筋中心的距离, $a = 15 \text{ mm}$; a' 为界面受压边缘至架立筋中心的距离, $a' = 10 \text{ mm}$; h_0 为截面有效高度; f_y 、 f'_y 分别为纵向受拉钢筋、架立筋屈服强度; A_s 、 A'_s 分别为纵向受拉钢筋、架立筋的截面面积.

计算出式(2)~(6)中相关参数, 联合式(1)、(7)、(8), 基于平截面假定, 可以求出不同环境作用后试验梁的剥离弯矩预测值, 通过 Matlab 软件得出如表 5 所示的计算结果.

为验证公式的可靠性, 对文献[17-18]中的试验结果也进行了计算, 计算结果如表 6 所示.

从表 5、表 6 中数据可知, 试验中的剥离弯矩计算值约具有 20%~30% 的安全储备, 且数据离散性较小. 由此可知, 在 Chen and Teng 建议的公式基础上引入环境影响系数对试验梁的剥离弯矩进行预测, 在一定程度上

上可以满足结构的安全需求^[19].

表5 各试验梁剥离弯矩值计算结果

Table 5 Calculation results of test beams debonding moment

编号	η	M_1	M_2	$((M_2 - M_1)/M_2)/\%$
F0W0L0	1.00	7.46	8.59	13
F0W0L1	0.89	7.03	8.32	16
F0W0L2	0.77	6.60	8.06	18
F150W45L0	0.79	6.69	8.02	17
F150W45L1	0.70	6.33	7.87	20
F150W45L2	0.61	5.97	7.67	22
F150W90L0	0.68	6.24	7.48	17
F150W90L1	0.60	5.97	7.41	19
F150W90L2	0.52	5.65	7.11	21
F300W45L0	0.70	6.33	7.96	20
F300W45L1	0.62	6.02	7.73	22
F300W45L2	0.54	5.70	7.52	24
F300W90L0	0.60	5.97	7.55	21
F300W90L1	0.53	5.70	7.22	21
F300W90L2	0.46	5.42	7.00	23

注: η 为各试验梁对应的环境损伤系数; M_1 为剥离弯矩预测值; M_2 为剥离弯矩实测值; $(M_2 - M_1)/M_2$ 为安全储备计算式,其平均值为20%,标准差为0.03.

表6 剥离弯矩值计算结果与试验值对比

Table 6 Comparison of debonding moment calculation and test results

编号	M_3	M_4	编号	M_5	M_6
F0L0	7.46	9.49	N0L0	7.46	9.5
F0L30	7.08	9.56	W40L0	7.08	9.94
F0L60	6.69	9.21	W40L30	6.73	9.8
F100L0	7.21	9.41	W40L60	6.38	9.62
F100L30	6.86	9.42	W80L0	6.69	9.59
F100L60	6.47	9.05	W80L30	6.38	9.4
F200L0	6.95	9.56	W80L60	6.06	9.25
F200L30	6.6	9.03	W120L0	6.24	9.16
F200L60	6.29	8.87	W120L30	5.97	8.68
F300L0	6.69	9.49	W120L60	5.7	8.28
F300L30	6.38	8.91	—	—	—
F300L60	6.06	8.5	—	—	—

注: M_3 、 M_5 均为剥离弯矩预测值, M_4 、 M_6 均为剥离弯矩实测值,其中 M_4 列数据取自文献[17], M_6 列数据取自文献[18].安全储备计算值剥离弯矩实测值和预测值两者的差值与剥离弯矩实测值的比值,对应的公式分别为 $(M_4 - M_3)/M_4$, $(M_6 - M_5)/M_6$,则对应的平均值和标准差分别为27%,30%和0.02,0.03.

3 结论

(1)在多因素环境作用下,试验梁表面损伤不明显,但CFRP-混凝土界面受到了较为不利的影 响.其破坏形态基本相似,均发生由弯剪裂缝引起的剥离破坏.

(2)冻融与干湿耦合作用较持续荷载单独作用对试验梁的影响更显著.冻融、干湿次数相同时,持载等级越高,试验梁的承载能力越低,剥离时的挠度越小.与此同时,在本次试验中,受早期冻融的影响,后期的干湿作用比冻融循环对CFRP-混凝土界面的损伤更严重.整个加载过程中试验梁的极限挠度均超过12 mm,表现出良好的延性.

(3)经过长时间的环境作用,试验梁的刚度出现了较为明显的退化.依据试验数据,笔者提出了环境损伤系数,对试验梁的剥离弯矩进行了预测,具有较好的参考价值.

(4)试验涉及影响因素较多,试验顺序、频次可能对试验结果存在一定的影响,有待于做进一步的研究.

参考文献

- [1] KIM Y J, HOSSAIN M, ZHANG J. A probabilistic investigation into deterioration of CFRP concrete interface in aggressive environments [J]. Construction & building materials, 2013, 41(2):49-59.
- [2] 李杉.环境与荷载共同作用下FRP加固混凝土耐久性[D].大连:大连理工大学,2009. (LI Shan. Durability of concrete strengthened with FRP under environmental and loading conditions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [3] SILVA M A G, BISCAIA H. Degradation of bond between FRP and RC beams [J]. Composite structures, 2008, 85(2):164-174.
- [4] 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. (YAO Yinjie. Experimental and numerical research of durability of FRP-high strength concrete joints under aggressive exposure conditions and sustained loads [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.)
- [5] 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, 1662-7482(638-640):1516-1520.
- [6] NADERI N, HAJINASRI S A. Using twist-off method for measuring CFRP/concrete adhesion when exposed to cyclic temperature changes, wet-dry and freeze-thaw[J]. *Journal of adhesion*, 2013, 89(7):559-577.
- [7] ARDALAN H, DAVOOD M. Effect of groove characteristics on CFRP-to-concrete bond behavior of ebrog joints; experimental study using particle image velocimetry (PIV) [J]. *Construction and building materials*, 2013, 49(4):364-373.
- [8] 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.
(LI Wenwei, XU Wenbing, ZHOU Yingwu, et al. Effect of sulfate solution dry-wet cycling environment on shear behavior of concrete beam externally bonded FRP [J]. *Journal of Beijing university of technology*, 2014, 40(8):1226-1231.)
- [9] SUBRA-MANIAM K V, ALI-AHMAD M, GHOSN M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface; impact on cohesive fracture response [J]. *Engineering fracture mechanics*, 2008, 75(13):3924-3940.
- [10] ZHANG D, SHEN S, ZHAO Y, et al. Cracking behavior of CFRP laminate-strengthened RC beams with premechanical and postmechanical environmental damage[J]. *Journal of composites for construction*, 2014, 19(4):04014066.
- [11] 彭晖, 王浩, 付俊俊, 等. 冻融循环下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的耐久性研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(3):344-352.
(PENG Hui, WANG Hao, FU Junjun, et al. Durability study of reinforced concrete beam strengthened with prestressed CFRP plate under freezing-thaw cycling [J]. *Journal of experimental mechanics*, 2014, 29(3):344-352.)
- [12] 曹建国, 李金玉, 林莉, 等. 高强混凝土抗冻性的研究[J]. *建筑材料学报*, 1999, 2(4):292-297.
(CAO Jianguo, LI Jinyu, LIN Li, et al. Study on frost - resistance of high - strength concrete [J]. *Journal of building materials*, 1999, 2(4):292-297.)
- [13] 岳清瑞, 杨勇新, 郭春红, 等. 浸渍树脂快速与自然老化试验对应关系[J]. *工业建筑*, 2006, 36(8):1-5.
(YUE Qingrui, YANG Yongxin, GUO Chunhong, et al. Relationship between accelerated and outdoor exposure experiment results of saturating resin [J]. *Industrial construction*, 2006, 36(8):1-5.)
- [14] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
(TENG Jinguang, CHEN Jianfei, SMITH S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.)
- [15] TENG J G, SMITH S T, YAO J, et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs[J]. *Construction and building materials*, 2003, 17(6/7):447-462.
- [16] 庞方腾. FRP 加固混凝土梁中弯剪裂缝引起剥离破坏的承载力研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009:258-265.
(PANG Fangteng. Research on strength of RC beams with externally bonded FRP sheets under intermediate flexural-shear crack induced debonding failure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009:258-265.)
- [17] 王苏岩, 宋泽林, 丁荔. 冻融循环与持载对 CFRP 加固高强混凝土梁变形性能的影响[J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(2):26-32.
(WANG Suyan, SONG Zelin, DING Li. Influence of freeze-thaw cycles and sustained loads on deformation performance of high strength concrete beam strengthened with CFRP [J]. *Journal of architecture and civil engineering*, 2017, 34(2):26-32.)
- [18] 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.
(WANG Suyan, DING Li, HONG Lei, et al. Durability study of high strength concrete beams strengthened with CFRP under sustained load and dry-wet cycles conditions [J]. *Journal of building structure*, 2017, 47(21):78-83.)
- [19] MCISAAC A, FAM A. Durability under freeze thaw cycles of concrete beams retrofitted with externally bonded FRPs using bio-based resins [J]. *Construction & building materials*, 2018, 168:244-256.