

文章编号:1673-2049(2017)02-0026-07

# 冻融循环与持载对 CFRP 加固高强混凝土梁变形性能的影响

王苏岩, 宋泽林, 丁 荔

(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:**通过四点弯曲试验,研究了冻融循环与持载对碳纤维增强复合材料(CFRP)加固高强钢筋混凝土梁变形性能的影响。分析了不同环境作用下试验梁的承载力、刚度及破坏形态变化规律。结果表明:在冻融循环单独作用下,试验梁的性能变化很小;冻融与持载耦合作用时,两者均对梁的性能造成不利影响,且随着冻融循环次数的增加,承受持载梁的 CFRP-混凝土界面黏结性能有所下降;在冻融循环作用下,CFRP-混凝土界面存在应力时会增大界面的劣化程度,从而引起加固梁性能的下降。

**关键词:**CFRP;冻融循环;持载;高强混凝土梁;极限承载力;变形性能

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A

## Influence of Freeze-thaw Cycles and Sustained Loads on Deformation Performance of High Strength Concrete Beam Strengthened with CFRP

WANG Su-yan, SONG Ze-lin, DING Li

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

**Abstract:** The four-point bending test was conducted to investigate the influence of freeze-thaw cycles and sustained loads on the deformation performance of high strength concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The bearing capacity, stiffness and failure mode of the test beam under different environmental conditions were analyzed. The results show that the performance of test beam changes little under the action of freeze-thaw cycles. Both of the two factors have negative effects on the performance of beam under the coupling action of freeze-thaw and sustained load, and the bond behavior of CFRP-concrete interface of beam under sustained load decreases with the increase of freeze-thaw cycles. The stress of CFRP-concrete interface will increase the deterioration degree of the interface under freeze-thaw cycles, and the performance of strengthened beam will decrease.

**Key words:** CFRP; freeze-thaw cycle; sustained load; high strength concrete beam; ultimate bearing capacity; deformation performance

## 0 引言

CFRP 加固混凝土结构已广泛应用于工程中,

迄今为止已有研究证实了 CFRP 加固混凝土梁在无复杂环境作用下的有效性<sup>[1]</sup>。然而,在北方近海工程中,CFRP 加固后的钢筋混凝土梁长期处于冻

收稿日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51378089)

作者简介:王苏岩(1958-),女,江苏灌云人,教授,E-mail:suyanw@dlut.edu.cn。

融循环与持载耦合作用下,这将影响加固梁黏结界面及混凝土材料的长期性能,因此对复杂环境作用下 CFRP 加固混凝土结构的研究十分必要。目前对 CFRP 加固混凝土结构在复杂环境下的研究大多局限于试块<sup>[2-9]</sup>的单剪或双剪试验,而 CFRP 加固混凝土梁的实际受力更复杂,单纯的剪切试验研究结论能否应用到梁等构件中不得而知。少数梁试验即使采用钢筋混凝土梁进行研究<sup>[10-17]</sup>,其作用环境也多为冻融循环或持载单一因素,研究很少涉及高强混凝土和复杂环境的耦合作用。

由试块冻融与持载耦合作用下的双剪试验研究可知,耦合作用时 CFRP-混凝土界面性能劣化程度更明显,因此针对单一环境作用下 CFRP 加固混凝土梁的研究并不能合理分析实际工程中加固梁的性能变化。曹大富等<sup>[18]</sup>的研究表明强度高的混凝土梁抗冻效果明显高于强度低的混凝土梁。基于此现状,本文利用自行设计的持续加载仪器对梁施加持载,对施加了持载的 CFRP 加固高强钢筋混凝土梁在冻融循环作用下的性能进行研究,以探讨冻融、持载对加固高强混凝土梁刚度、承载力、破坏形态等方面的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验中混凝土的强度等级为 C60,配合比见表 1。实测混凝土 28 d 标准立方体抗压强度为 71.43 MPa。采用日本东丽 I300 碳纤维布,其物理力学性能见表 2。采用大连凯华公司 JGN 型底涂胶和浸渍胶,浸渍胶抗拉强度为 40 MPa,抗压强度为 75 MPa,弹性模量为 2 500 MPa。

表 1 混凝土配合比

Tab.1 Mix Proportion of Concrete

各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						水胶比
水	水泥	粉煤灰	砂	石子	减水剂	
147	396	62	641	1 246	9	

表 2 CFRP 物理力学性能

Tab.2 Physical and Mechanical Properties of CFRP

抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	计算厚度/mm
3 634.5	236	1.7	0.167

### 1.2 试验梁设计

钢筋混凝土梁截面尺寸为 80 mm×120 mm,梁长 900 mm,计算跨度为 800 mm。上部架立钢筋采用 2φ6,下部受拉钢筋采用 2φ8,箍筋采用 φ6@80。钢筋混凝土梁的尺寸及配筋如图 1 所示。标准养护

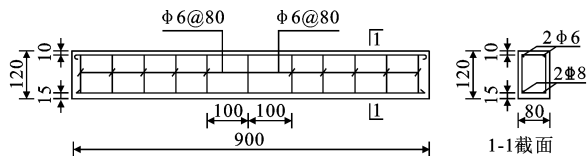


图 1 混凝土梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.1 Dimension and Reinforcement of Concrete Beam (Unit:mm)

28 d 后,打磨掉混凝土梁上待贴 CFRP 布位置处的浮浆。将 760 mm×70 mm 的 CFRP 布条粘贴在梁底部,所有试验梁均粘贴 2 层。为防止 CFRP 布与混凝土界面发生端部滑移,在端部分别粘贴 2 层 70 mm 宽的 CFRP 布条。CFRP 布粘贴位置如图 2 所示,粘贴方法参照文献<sup>[19]</sup>。

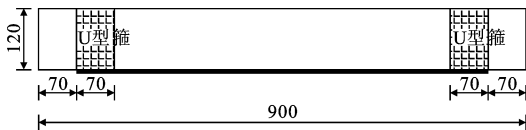


图 2 CFRP 布粘贴位置(单位:mm)

Fig.2 Paste Positions of CFRP Strips (Unit:mm)

### 1.3 持续加载系统设计

试验梁有 3 种持载等级:L0(0 kN),L30(9 kN),L60(18 kN),分别为未粘贴 CFRP 布混凝土梁极限承载力的 0%,30%,60%。持载通过自行设计的持载器施加到混凝土梁上(图 3),用夹式引伸计测量 2 个加载点处混凝土梁至持载器底板的竖向位移,加载到预定荷载时停止加载并记录夹式引伸计的读数;卸载并重复上一步骤,当相邻 2 次加载结束且夹式引伸计读数相差小于 5%时停止重复,此操作可消除梁与支座接触不良而造成的误差。再次加载到预定荷载,拧紧螺母后卸载,调整螺母使夹式引伸计的读数达到目标值。

### 1.4 冻融循环试验

冻融试验采用快冻法进行,冻融前将试验梁浸泡 5 d。平均每次冻融循环时间为 3 h,混凝土试件中心温度上限和下限分别为(8±2)℃和(-17±2)℃,冻融循环在清水中进行,冻融循环次数取 100,200,300 三个等级。

### 1.5 试验梁编号

试验采用 12 根梁,分别作用于不同环境下,试验参数设计如表 3 所示。

### 1.6 加载试验

采用 100 t 电液伺服材料试验机对梁进行四点弯曲加载,加载速度控制为 0.2 mm·min<sup>-1</sup>。试验中主要采集以下数据:①通过 10 t 荷载传感器测量

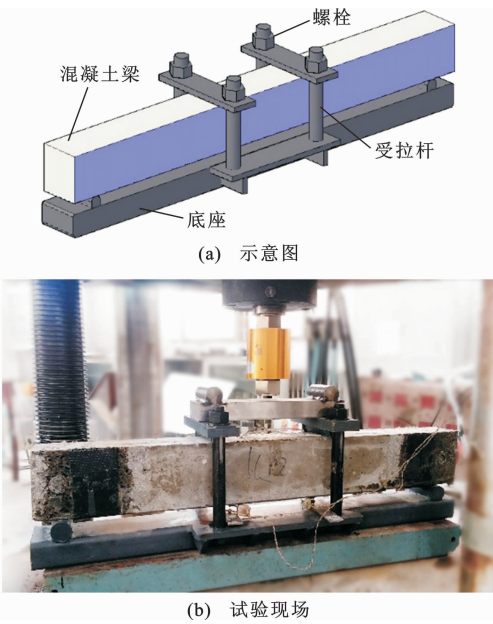


图 3 加载装置  
Fig. 3 Loading Device  
表 3 试验参数设计

Tab. 3 Test Parameters Design

试验梁编号	冻融循环次数	持载水平/kN
F0L0	0	0
F0L30	0	9
F0L60	0	18
F100L0	100	0
F100L30	100	9
F100L60	100	18
F200L0	200	0
F200L30	200	9
F200L60	200	18
F300L0	300	0
F300L30	300	9
F300L60	300	18

施加在试验梁上的实际荷载；②通过线性可变差动变压器(LVDT)测量混凝土梁跨中挠度；③通过粘贴在 CFRP 布上的应变片对 CFRP 片材的应变进行测量，每根试验梁 CFRP 表面粘贴 13 个应变片；④通过粘贴在混凝土梁侧面的 5 个应变片来测量梁的侧面变形情况；⑤通过预埋应变片测量混凝土中纵向受力钢筋的应变，判断钢筋屈服情况；⑥用 Supereyes 超眼电子显微镜测量混凝土梁侧面的裂缝宽度，观察混凝土裂缝发展情况，并记录混凝土开裂荷载及梁达到正常使用极限状态时的荷载。除裂缝宽度外，所有数据均由动态 IMC 数据采集系统进行采集。试验梁测点布置如图 4 所示。

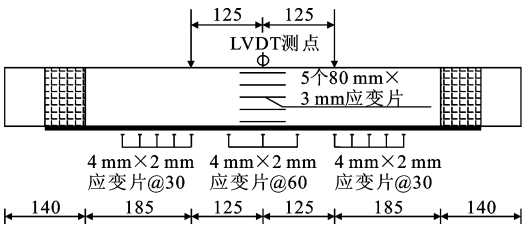


图 4 测点布置(单位:mm)  
Fig. 4 Arrangement of Measuring Points (Unit:mm)

2 试验结果与分析

2.1 极限承载力

表 4 为持载和冻融循环作用下各试验梁的试验结果。图 5 为试验梁的极限荷载曲线。由图 5 可以看出:随着冻融循环次数的增加,L0 持载梁的极限承载力并未下降,这是因为高强混凝土耐冻性强,冻融循环对不持载梁的侵蚀较小,且冻融过程中混凝土会继续水化使得其强度得到一定程度的增强<sup>[2]</sup>;L30,L60 持载梁的极限承载力有明显下降,说明持载会显著增大冻融循环对 CFRP 加固梁的侵蚀程度;L60 较 L30 持载梁的极限承载力下降更显著,其原因主要为 L60 持载梁在冻融循环过程中是带裂缝工作的,裂缝处的混凝土及环氧树脂胶层直接与冻融溶液接触,裂缝中溶液结冰膨胀使得附近 CFRP-混凝土界面应力增加,从而使其受冻融循环的侵蚀更加充分。

表 4 各试验梁的试验结果

Tab. 4 Test Results of Beam Specimens kN				
试验梁编号	$F_{max}$	$F_{cr}$	$F_1$	$F_2$
F0L0	69.0	14.4	31.0	53.0
F0L30	69.5	13.0	30.1	55.0
F0L60	67.0	12.3	28.5	55.0
F100L0	68.4	11.5	34.4	50.0
F100L30	68.5	14.0	31.9	54.0
F100L60	65.8	13.9	29.1	52.0
F200L0	69.5	14.2	33.6	54.2
F200L30	65.7	12.9	31.4	55.0
F200L60	64.5	12.6	28.5	55.0
F300L0	69.0	12.3	31.2	52.7
F300L30	64.8	13.7	26.9	51.6
F300L60	61.8	12.3	25.3	49.5

注: $F_{max}$ 为极限荷载; $F_{cr}$ 为开裂荷载; $F_1$ 为出现 10 条裂缝时的荷载; $F_2$ 为最大裂缝宽度 0.2 mm 时的荷载。

100 次冻融循环时,L0,L30 持载梁极限承载力相近,且较初始时都未曾下降,表明在短期冻融循环下,小于开裂荷载的持载等级对梁的承载力影响很

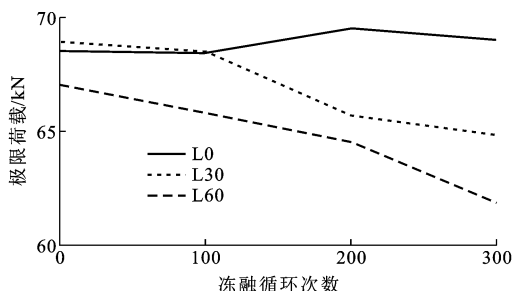


图 5 试验梁的极限荷载曲线

Fig. 5 Ultimate Load Curves of Test Beams

小;L60 持载梁极限承载力比 L0 持载梁降低 4%,且较初始时也有所下降,表明无论是否处于冻融循环下,较高等级的持载均对梁的承载力有明显的不利影响。

与冻融前相比,冻融循环 200 次时,L30 持载梁极限承载力下降 5.5%,L0 持载梁极限承载力没有下降,说明冻融循环 200 次以后,低等级持载也会显著增大冻融循环对梁的侵蚀。这与 L60 持载梁通过裂缝增大侵蚀的机理不同。由于承受持载,在梁有效长度内 CFRP-混凝土界面始终有切应力作用,切应力与冻融循环共同作用时会加速 CFRP-混凝土界面的裂化<sup>[2,5]</sup>,从而使梁承载力下降。

图 6 为试验梁出现 10 条裂缝时对应的荷载曲线,可以发现冻融循环次数相同时,持载等级对梁裂缝的开展影响显著。在 0,100,200,300 次冻融循环作用下,L60 持载等级的试验梁  $F_1$  值分别下降了 8%,15.4%,15.2%,18.9%。结果表明,持载作用会加速加固梁裂缝的开展,使得梁的延性变差。

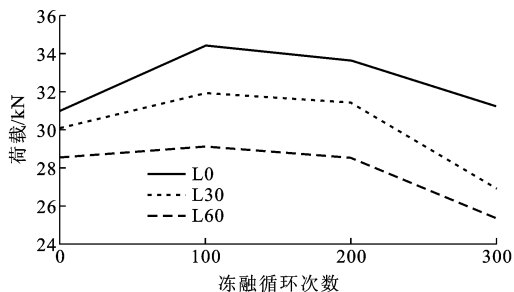


图 6 10 条裂缝时的荷载曲线

Fig. 6 Load Curves when Crack Number Is 10

## 2.2 跨中挠度

图 7 为各持载等级试验梁在经受不同次数冻融循环后的荷载-挠度曲线。由图 7 可以看出:经受相同次数冻融循环的试验梁在荷载大于 15 kN 后(由表 4 可知 15 kN 时所有试验梁都已开裂),承受荷载相同时,持载等级越高的试验梁其跨中挠度越大;未受冻融循环时,不同持载等级梁的荷载-挠度曲线相

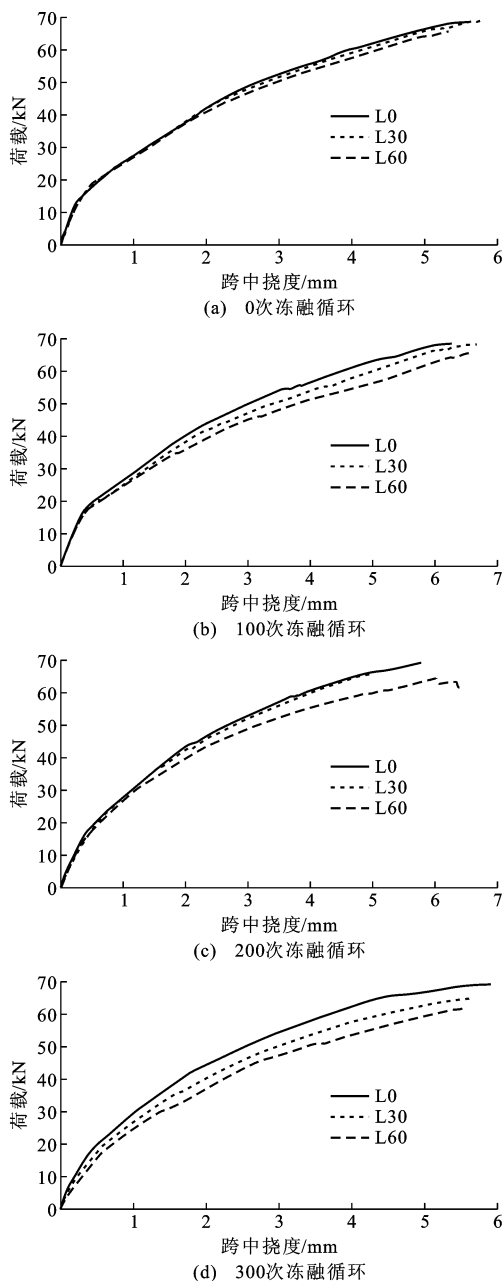


图 7 试验梁的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection Curves of Test Beams

差不大。这说明持载对梁刚度的影响在冻融循环作用下更明显,其原因为冻融时承受持载越大,梁的 CFRP-混凝土界面劣化情况越严重,使得在相同荷载作用下,持载大的梁裂缝发展更快,CFRP 更容易剥离。未受冻融循环作用时,持载对梁的刚度影响较缓慢,试验中施加持载的时间不足以对梁的刚度产生显著影响。

由图 7(b)~(d)可以看出:100,200 次冻融循环时,相同冻融循环次数各持载等级的试验梁在加载前期荷载-挠度曲线几乎相同,说明冻融循环 200 次及以下时,开裂荷载前梁的刚度没发生变化;300 次

冻融循环时,各持载等级的试验梁在加载前期荷载-挠度曲线便不同,说明冻融循环 300 次时,开裂荷载前梁的刚度已发生变化。

图 8 为持载等级 L60 的各试验梁开裂前荷载-挠度曲线。加载至 2 kN 后数据采集稳定,取 2~12 kN 部分进行试验梁线性阶段刚度分析,结果如表 5 所示。本文将试验梁出现裂缝之前的刚度称为开裂前刚度。由表 5 可见,冻融循环次数越多,试验梁开裂前刚度降低的程度越大,冻融循环 300 次后开裂前刚度已降低 38.2%。这说明冻融循环对承受 L60 等级持载梁的开裂前刚度有显著影响。

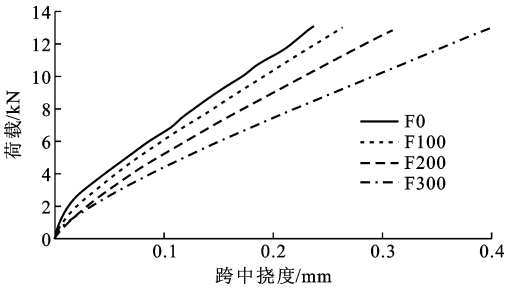


图 8 持载等级 L60 的各试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection Curves of Test Beams Under Sustained Load L60

表 5 试验梁刚度

Tab. 5 Stiffness of Test Beams

试验梁 编号	加载 2 kN 时 的挠度/mm	加载 12 kN 时 的挠度/mm	刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	刚度降低 率/%
F0L60	0.012 1	0.218 2	48.54	
F100L60	0.021 1	0.241 9	45.29	6.7
F200L60	0.030 6	0.287 0	39.00	19.7
F300L60	0.034 6	0.368 1	29.99	38.2

2.3 破坏形态

所有试验梁的破坏形态及破坏过程中裂缝的发展情况大致相同。取冻融循环 200 次的梁进行分析,其破坏形态如图 9 所示。加载初期,梁处于弹性阶段,随着荷载的增加在纯弯段首先出现几条竖向裂缝,且裂缝出现于距离梁底面 3 cm 左右位置,继而向梁上下 2 个方向扩展。这是因为梁底面粘贴有 CFRP 布,约束了附近混凝土的开裂。当荷载继续增加时,在剪弯段出现斜裂缝,靠近加载点处的斜裂缝发展为主裂缝,破坏是由主裂缝处 CFRP 剥离引起的,破坏形态属于中部弯剪裂缝引起的界面剥离破坏<sup>[20]</sup>。

由图 9 可知,冻融循环均为 200 次时,承受持载越大的梁破坏时剥离位置距离跨中越近。这说明 200 次冻融循环对加固梁抗弯性能的影响大于对抗

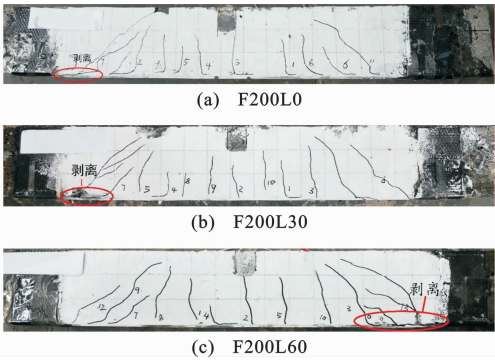


图 9 试验梁的破坏形态

Fig. 9 Failure Modes of Test Beams

剪性能的影响。持载 L60 梁跨中裂缝数量明显少于持载 L0, L30, 说明带裂缝冻融的梁延性显著降低。

对比所有试验梁破坏后 CFRP 布粘下混凝土的厚度情况,发现编号为 F200L30, F200L60, F300L30, F300L60 的梁 CFRP 布粘下的混凝土明显少于其他梁。这说明冻融循环达到 200 次后,持载与冻融耦合作用会对 CFRP-混凝土界面造成较为明显的不利影响,使得胶层与混凝土的黏结力减弱,CFRP-混凝土界面更容易剥离。这也是破坏形态相同的情况下这 4 根梁极限承载力低的原因之一。

2.4 剥离荷载计算

各试验梁的破坏形态均为剥离破坏,界面剥离时梁截面受力分析如图 10 所示,其中,  $h$  为截面高度,  $h_0$  为受拉钢筋中心到截面上端的距离,  $x_c$  为混凝土受压区高度,  $\epsilon_{cl}$  为截面上端混凝土应变,  $\epsilon_s$  为钢筋应变,  $\epsilon_{frp}$  为 CFRP 应变,  $M$  为截面弯矩,  $F_{frp}$  为 CFRP 布拉力值,  $f_y$  为受拉钢筋的抗拉强度设计值,  $A_s$  为截面处受拉钢筋总面积,  $C$  为受压区混凝土合力值,  $y_c$  为合力  $C$  的作用点至混凝土受压区下端距离,  $x_{cl}$  为未达到屈服应力的受压区混凝土高度。

受压区混凝土压应力合力  $C$  为

$$C = \int_0^{x_{cl}} f_c [1 - (1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^{1.83}] b dy + \int_{x_{cl}}^{x_c} f_c b dy$$

合力  $C$  到中和轴的距离  $y_c$  为

$$y_c = \{ \int_0^{x_{cl}} f_c [1 - (1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0})^{1.83}] b y dy + \int_{x_{cl}}^{x_c} f_c b y dy \} C^{-1}$$

力的平衡条件为

$$C = f_y A_s + 2 E_{frp} \epsilon_{frp} t d$$

截面计算弯矩  $M$  为

$$M = f_y A_s (h_0 - w) + 2 E_{frp} \epsilon_{frp} t d (h - w)$$

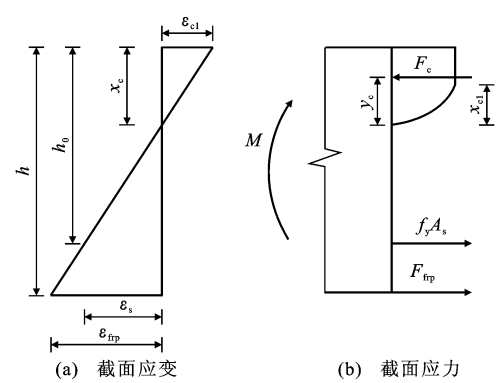


图 10 受力计算简图

Fig. 10 Calculation Diagram of Stress

式中:  $w = x_c - y_c$ ;  $\epsilon_0$  为混凝土峰值应变,其值为 0.002 05;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $\epsilon_c$  为混凝土应变;  $b$  为梁宽;  $E_{frp}$  为 CFRP 弹性模量;  $\epsilon_{frp}$  为 CFRP 剥离时的应变;  $t$  为单层 CFRP 布的厚度;  $d$  为 CFRP 布条宽度。

运用 MATLAB 计算后,各试验梁剥离截面弯矩计算结果与试验结果对比如表 6 所示。

表 6 计算结果与试验结果对比

Tab. 6 Comparison Between Calculated and Experimental Results

试验梁 编号	$F_s/\text{kN}$	$\epsilon_{frp}$	$l_1/\text{mm}$	$M_s/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$(M_s - M)/M_s/\%$
F0L0	69.0	7 633	245	8.45	6.97	17.5
F0L30	69.5	7 725	245	8.52	7.08	16.9
F0L60	67.0	5 873	215	7.18	6.18	13.9
F100L0	68.4	5 305	155	5.30	5.89	-11.1
F100L30	68.5	7 947	185	6.34	7.18	-13.2
F100L60	65.8	7 209	185	6.08	6.83	-12.3
F200L0	69.5	6 361	155	5.39	6.43	-19.3
F200L30	65.7	5 879	215	7.08	6.18	12.7
F200L60	64.5	6 396	245	7.84	6.44	17.9
F300L0	69.0	6 198	155	5.35	6.14	-14.8
F300L30	64.8	6 068	155	5.02	6.02	-19.9
F300L60	61.8	5 497	215	6.65	5.96	10.4

注:  $F_s$  为试验梁的剥离荷载;  $l_1$  为剥离处与邻近支座的距离;  $M_s$  为剥离截面的实测弯矩。

由表 6 可知,未经受冻融循环的加固梁应用上述公式计算结果偏安全,而经受冻融循环后,会出现计算结果低于试验值的情况。这是因为未受冻融循环的加固梁 CFRP-混凝土界面强度高,界面剥离扩展速度慢,使得梁截面各材料可以继续受力,因此试验值会高于采用设计值得到的计算结果。经受冻融循环的试验梁,其 CFRP-混凝土界面强度较弱,剥离发生时迅速延伸,截面混凝土受压区高度变小,从

而使得试验得到的界面弯矩低于计算值。

### 3 结 语

(1)在相同冻融循环次数下,持载等级越高的梁极限承载力与刚度下降越大。L0,L30,L60 持载梁冻融循环 300 次后承载力分别下降 0%,6.76%,7.76%,冻融循环作用下裂缝的存在会显著增加梁性能的劣化程度。

(2)持载等级为 L60 的加固梁在经受 300 次冻融循环后,其开裂前刚度下降 38.2%,可见冻融循环对持载梁开裂前刚度有较大影响。

(3)冻融循环 200 次时,L60 持载梁跨中裂缝数量明显少于持载 L0,L30,可知持载等级高的梁经受冻融循环后延性显著降低。

(4)加固梁经受冻融循环以后,采用材料设计值计算得到的剥离荷载偏小,甚至会低于试验值。建议进一步研究冻融循环后加固梁各材料强度的下降规律,以得出合理的用于计算加固梁剥离荷载的模型。

### 参考文献:

#### References:

[1] 张益多,刘荣桂. 混凝土结构加固技术研究及应用综述[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2003,24(6):91-94.  
ZHANG Yi-duo, LIU Rong-gui. Survey on Research and Application of Strengthening Techniques in Reinforced and Pre-stressed Concrete Structures[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2003,24(6):91-94.

[2] 李璐希. 荷载与环境共同作用下 CFRP 与高强混凝土的粘结耐久性研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.  
LI Lu-xi. Durability of Bond Performance Between CFRP and High Strength Concrete Under Loading and Environmental Conditions [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2015.

[3] GREEN M F, BISBY L A, BEAUDOIN Y, et al. Effect of Freeze-thaw Cycles on the Bond Durability Between Fibre Reinforced Polymer Plate Reinforcement and Concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2000,27(5):949-959.

[4] YUN Y, WU Y F. Durability of CFRP-concrete Joints Under Freeze-thaw Cycling[J]. Cold Regions Science and Technology,2011,65(3):401-412.

[5] SUBRAMANIAM K V, ALI-AHMAD M, GHOSN M. Freeze-thaw Degradation of FRP-concrete Inter-

- face; Impact on Cohesive Fracture Response[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75 (13): 3924-3940.
- [6] 肖建庄, 于海生. 纤维布与混凝土间的粘结耐久性试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 291-296.
- XIAO Jian-zhuang, YU Hai-sheng. Experimental Study on Durability of Bond Between Fiber Reinforced Plastic Sheet and Concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(3): 291-296.
- [7] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 520-526.
- REN Hui-tao, YAO Qian-feng, HU An-ni. Experimental Study on Durability of Fiber Reinforced Polymer[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 520-526.
- [8] 杨勇新, 郭春红, 才 鹏, 等. 海水对 CFRP-混凝土界面影响的试验[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 10-12.
- YANG Yong-xin, GUO Chun-hong, CAI Peng, et al. The Effect of Sea Water on CFRP-concrete Interface [J]. Industrial Construction, 2006, 36(8): 10-12.
- [9] 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, 29(增): 176-180.
- WANG Su-yan, YIN Xiao-ming, LIU Lin. Experimental Research on Shear Behavior of High Strength Concrete Strengthened with CFRP in Frost Environment [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(S): 176-180.
- [10] HONG S, PARK S K. Long-term Behavior of Fiber-reinforced-polymer-plated Concrete Beams Under Sustained Loading: Analytical and Experimental Study [J]. Composite Structures, 2016, 152: 140-157.
- [11] HMIDAN A, KIM Y J, YAZDANI S. Effect of Sustained Load Combined with Cold Temperature on Flexure of Damaged Steel Beams Repaired with CFRP Sheets[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1957-1966.
- [12] OMRAN H Y, EI-HACHA R. Effects of Sustained Load and Freeze-thaw Exposure on RC Beams Strengthened with Prestressed NSM-CFRP Strips [J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(12): 1801-1806.
- [13] 王 鹏. 冻融循环下 CFRP 加固受损钢筋混凝土梁的力学性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.
- WANG Peng. Research on Mechanical Properties of Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Under Freeze-thaw Environment[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2015.
- [14] SILVA M A G, BISCAIA H. Degradation of Bond Between FRP and RC Beams[J]. Composite Structures, 2008, 85(2): 164-174.
- [15] 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.
- [16] 王苏岩, 杨 玫. 碳纤维布加固高强钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑科学, 2006, 22(5): 34-38, 70.
- WANG Su-yan, YANG Mei. Experimental Study of Flexural Behavior of High-strength RC Beams Strengthened with CFRP Sheets[J]. Building Science, 2006, 22(5): 34-38, 70.
- [17] 王文炜, 赵国藩, 黄承逵, 等. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 172-178.
- WANG Wen-wei, ZHAO Guo-fan, HUANG cheng-kui, et al. An Experimental Study of Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using CFRP Sheets [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 172-178.
- [18] 曹大富, 葛文杰, 郭容邑, 等. 冻融循环作用后钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 137-144.
- CAO Da-fu, GE Wen-jie, GUO Rong-yi, et al. Experimental Study on Flexural Behaviors of RC Beams After Freeze-thaw Cycles[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 137-144.
- [19] CECS 146: 2003, 碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].
- CECS 146: 2003, Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate[S].
- [20] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP 加固混凝土结构[M]. 李 荣, 滕锦光, 顾 磊, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Translated by LI Rong, TENG Jin-guang, GU Lei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.