

文章编号:1673-2049(2018)04-0054-09

复杂环境及荷载共同作用下 CFRP 加固高强钢筋 混凝土梁受力性能试验

王苏岩,张红涛,朱方芳,刘振杰

(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:为研究冻融循环、湿热环境、持续荷载等因素共同作用对碳纤维增强复合材料(CFRP)加固高强钢筋混凝土梁耐久性的影响,制作了 15 根 CFRP 加固钢筋混凝土梁。对荷载和环境因素耦合作用下 CFRP 加固钢筋混凝土梁的结构性能进行了试验研究和理论分析。结果表明:湿热环境和冻融循环都会对 CFRP 加固钢筋混凝土试件产生不同程度的影响;采用 CFRP 加固钢筋混凝土梁将增加试件刚度,但环境作用使得黏结界面劣化,从而使加固试件刚度降低,变形增大;持续荷载会加速环境对 CFRP 加固钢筋混凝土试件的劣化速度,并且随着荷载等级的增大,影响越来越明显;相同环境作用下,持续荷载使得试件极限承载力降低,并且随着持续荷载的增加,试件承载力降低加快;经受 150 次冻融循环、湿热 1 000 h 作用时,持续荷载等级为 30%,60%试件的承载能力分别下降 2.5%,10.2%,持续荷载会加速劣化加固混凝土试件的抗弯性能;温度 40°、湿度 98%的湿热环境下 500 h 比冻融循环 150 次对试件劣化程度产生的影响更为显著。

关键词:CFRP;冻融循环;湿热环境;持续荷载;钢筋混凝土梁;耐久性

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Mechanical Performance Test of High-strength Reinforced Concrete Beam Strengthened by CFRP Under Combined Action of Complex Environment and Loading

WANG Su-yan, ZHANG Hong-tao, ZHU Fang-fang, LIU Zhen-jie

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

Abstract: In order to study the effects of freeze-thaw cycles, hot and humid environment and sustained loads on the durability of high-strength reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), a total of 15 reinforced concrete beams strengthened by CFRP were fabricated. The structural performances of reinforced concrete beams strengthened with CFRP under the interaction of load and environment were studied and theoretically analyzed. The results show that both hot and humid environment and freeze-thaw cycles have certain degrees of influences on reinforced concrete beams strengthened by CFRP. The effect of environment on the bonding interface deteriorates, and the stiffness of strengthened specimen decreases and the deformation increases. Sustained load will speed up the degradation of reinforced concrete beams strengthened by CFRP in coupled external environment, and the higher

收稿日期:2017-11-22

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。

the sustained load increases, the more obvious the degradation effect is. Under the same environment, the ultimate bearing capacity of specimen is reduced, and the bearing capacity of specimen decreases as the continuous load increases. Under the action of 150 freeze-thaw cycles and 1 000 h continuously in hot and humid environment, the bearing capacities of specimens under 30% and 60% load grades decrease by 2.5% and 10.2% respectively. The continuous load will accelerate the bending resistance of damaged concrete specimens; the degradation effects on specimens of 500 h continuously in the environment with temperature of 40 ℃, humidity of 98% are larger than those of 150 freeze-thaw cycles.

Key words: CFRP; freeze-thaw cycle; hot and humid environment; sustained load; reinforced concrete beam; durability

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,CFRP)具有质量轻、强度高、耐腐蚀、抗疲劳、易于施工等诸多优点,外贴 CFRP 是一种高效加固钢筋混凝土梁的补强加固方式。对于混凝土结构的实际工作环境,其往往承受着温度、湿度、冻融及荷载等多种条件的共同作用。

近年来,许多学者开展了温度对 CFRP 及黏结树脂的研究,但大多数研究主要集中在材料方面^[1-7],Subramaniam 等^[8]通过试验发现,冻融循环作用使得试件界面承载力下降,导致界面有效黏结长度下降。李晓艳^[9]研究了黏结树脂在湿热环境下的耐久性,结果表明,在湿热环境下树脂的抗拉强度降低明显,弹性变化较小,玻璃化温度下降。同时也有研究恶劣环境下 CFRP 加固混凝土梁结构的承载力^[10-12],但作用环境单一,多种环境共同作用的情况较少。

综上所述,目前对于 CFRP 加固混凝土结构在材料、界面、单一环境作用下的耐久性研究较多,而在中国北方沿海地区,夏季高温潮湿,冬季寒冷干燥,对于大量暴露在室外或处在恶劣环境下的加固结构,湿热环境和冻融循环是造成这类结构破坏的主要原因之一。因此,本文研究冻融循环、湿热环境、持续荷载作用下的混凝土结构具有重要意义,可为复杂环境下 CFRP 加固钢筋混凝土梁的研究及应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究复杂环境对 CFRP 加固钢筋混凝土梁开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、刚度和延性的影响,试验中以冻融循环次数、湿热环境时长、持续荷载等

级等因素为变化参数,设计并制作了 15 根钢筋混凝土梁试件。试件设计参数见表 1。

表 1 CFRP 加固钢筋混凝土梁试件参数
Tab. 1 Parameters of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP

| 试件编号 | 荷载等级/kN | 冻融循环次数 | 湿热时间/h |
|--------------|---------|--------|--------|
| L0F0H0 | 0 | 0 | 0 |
| L0F150H0 | 0 | 150 | 0 |
| L0F0H500 | 0 | 0 | 500 |
| L0F150H500 | 0 | 150 | 500 |
| L10F150H500 | 12 | 150 | 500 |
| L20F150H500 | 24 | 150 | 500 |
| L0F300H500 | 0 | 300 | 500 |
| L10F300H500 | 12 | 300 | 500 |
| L20F300H500 | 24 | 300 | 500 |
| L0F150H1000 | 0 | 150 | 1 000 |
| L10F150H1000 | 12 | 150 | 1 000 |
| L20F150H1000 | 24 | 150 | 1 000 |
| L0F300H1000 | 0 | 300 | 1 000 |
| L10F300H1000 | 12 | 300 | 1 000 |
| L20F300H1000 | 24 | 300 | 1 000 |

各试验梁均采用尺寸为 80 mm×120 mm 的矩形截面钢筋混凝土简支梁,梁长 $L=900$ mm,计算跨度 $l_0=800$ mm,采用相同的配筋和 C60 混凝土配合比,上部架立钢筋采用 2 Φ 6(HPB300),下部受拉钢筋采用 2 Φ 8(HRB400),箍筋采用 Φ 6@60(HRB400),混凝土保护层厚度为 10 mm。试件几何尺寸及配筋详见图 1。

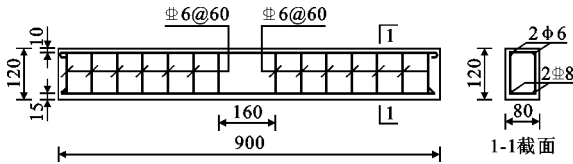


图 1 试件几何尺寸及配筋(单位:mm)
Fig. 1 Geometry Scales and Reinforcement of Specimens (Unit:mm)

CFRP 布的粘贴情况为:梁底受拉区粘贴 2 层 CFRP 布(尺寸为 70 mm×760 mm),距试件左右两端 70 mm 处各粘贴 1 层 CFRP 布(尺寸为 70 mm×320 mm)作为 U 形箍进行端部锚固。粘贴方式及尺寸详见图 2。

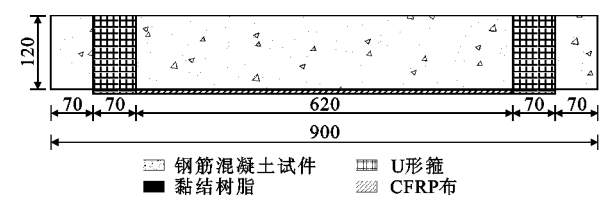


图 2 CFRP 粘贴方式及尺寸(单位:mm)
Fig. 2 Posting Form and Geometry Scales of CFRP Sheets (Unit:mm)

1.2 试验材料

试验采用的 CFRP 布为日本东丽生产的 I300 单向编制 CFRP 布,其物理力学性能详见表 2。CFRP 布粘贴所用 JGN 型碳纤维建筑结构胶包括 2 种类型:底涂树脂、浸渍树脂,2 种胶均为甲、乙双组分,甲、乙按照 3 : 1 的比例均匀混合使用,其物理力学性能详见表 3,4。

表 2 CFRP 布物理力学性能

| Tab. 2 Physical and Mechanical Properties of CFRP Sheets | | | |
|--|----------|----------|-------|
| 计算厚度/mm | 弹性模量/GPa | 抗拉强度/MPa | 延伸率/% |
| 0.167 | 231 | 3 578 | 1.685 |

表 3 底涂树脂物理力学性能

| Tab. 3 Physical and Mechanical Properties of Resins at Bottom of Specimens | | | |
|--|---------------|-------|-------------------|
| 钢-钢剪切黏结强度/MPa | 混凝土正拉黏结强度/MPa | 固含量/% | 混合黏度(23℃)/(MPa·s) |
| ≥16 | ≥2.5 | ≥99 | ≤2 000 |

表 4 浸渍树脂物理力学性能

| Tab. 4 Physical and Mechanical Properties of Impregnated Resins | | | | |
|---|----------|----------|-------|----------|
| 抗拉强度/MPa | 抗弯强度/MPa | 抗压强度/MPa | 拉伸率/% | 弹性模量/MPa |
| ≥40 | ≥55 | ≥75 | ≥1.8 | ≥2 500 |

1.3 试验描述

为真实模拟实际工程中梁的加固情况,在试验梁施加持续荷载前将钢筋混凝土梁进行预裂,施加 10 kN 荷载之后卸载。然后按前述方法粘贴 CFRP 布进行试验梁加固。

用 CFRP 加固后的试验梁在正常情况下养护 21 d 后施加持续荷载。对未加固梁进行静载试验,按其承载能力的 0%,30%,60%分为 3 个荷载等级

进行试件加载,相应荷载为 0,10,20 kN。持载装置见图 3。

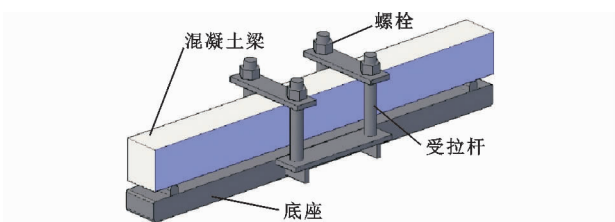


图 3 持载装置示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Sustained Load Device

在持续荷载作用下,将试验梁先后置于冻融循环环境及湿热环境进行复杂环境影响。具体试验环境如下所述:

冻融循环试验采用北京数智意隆仪器公司的混凝土快速冻融试验机,试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/J 50082—2009)中抗冻性能试验的快冻法进行,试验前将试验梁置于清水中浸泡 4 d 后进行冻融试验。每次冻融循环时间为 3 h,中心温度的上下限分别为 8℃±2℃和-17℃±2℃,冻融循环次数取为 150 和 300。

湿热试验采用 YH-40B 型标准恒温恒湿养护箱,试验参照《玻璃纤维增强塑料湿热试验方法》(GB 2573—2008)进行,温度设定在 40℃,湿度保持在 98%,湿热时长取为 500 h 和 1 000 h。

1.4 试验加载及量测

混凝土梁受弯性能试验参照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)进行,使用 1 000 kN 的电液伺服万能试验机,采用四点弯曲加载方式加载。试件加载现场见图 4。



图 4 试件加载现场

Fig. 4 Loading Site of Specimen

试件加载前检验观测仪器是否正常,然后进行预加载和正式加载。预加载分 3 级进行,每级增量为 2 kN,预加载值为 6 kN,约为计算开裂荷载值的 70%,每级持载 10 min,然后分 2 级卸载。当钢筋达到屈服后,改为位移控制加载,以便确定极限

荷载。

在 0~20 kN 时采用每次 5 kN 加载,加载至 20 kN 后,再采用每级 3 kN 加载,直至试验梁破坏,每级荷载稳定 3 min 后记录数据采集结果,再进行下级荷载等级的加载,直至破坏,停止加载。

应变测点布置方式见图 5。试件量测步骤为:

(1)使用放大镜观测裂缝出现及发展过程和形态,采用裂缝观测仪测量试件受压时裂缝的宽度。

(2)为测量不同材料在加载过程中不同阶段的受力情况,在混凝土浇筑前分别在纵筋跨中部位、试件侧面混凝土跨中、梁底 CFRP 布上粘贴应变片,通过动态 IMC 数据采集系统采集相应应变。

(3)在梁跨中处布置 LVDT,量测跨中挠度。

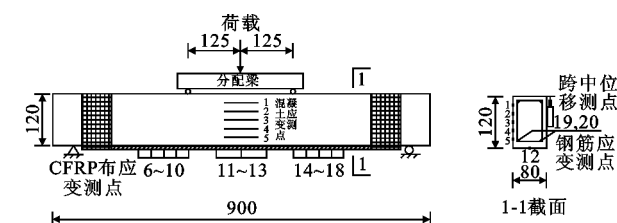


图 5 位移测点和应变测点布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of Displacement and Strain Measuring Points (Unit:mm)

2 试验结果及分析

2.1 裂缝开展和破坏形态

试件的破坏过程和破坏形态类似,都是由中部弯曲裂缝^[13]引起的界面剥离破坏,具体裂缝分布与发展特征见图 6。破坏过程如下:加载过程中首先在试件中部纯弯段出现几条第 1 批裂缝 a,该裂缝为弯曲应力引起的主裂缝,随着荷载的增加,在裂缝 a 之间产生新的裂缝 b,本文中 a, b 统称为主裂缝,此裂缝随着荷载的增加进一步上升到较高的高度。荷载继续增加,在试件两端的弯剪段产生由于剪力引起的斜裂缝 c,但此裂缝在加载过程中发展缓慢,并不会影响最终破坏形态。钢筋附近的次裂缝 d 为横向裂缝,荷载在 40~50 kN 时,由于混凝土底部粘贴 CFRP 布从而使混凝土应变减小,但钢筋屈服后应变急剧增大,钢筋与混凝土之间的黏结应力大于混凝土的抗拉应力,从而产生此种裂缝,这种裂缝发展程度同样很低。主裂缝 a 和 b 的发展受到 CFRP 布的限制,当 CFRP 布受力很大时,引起混凝土底部和 CFRP 布产生局部剥离裂缝 e,在混凝土下部形成三角形区域,从而引起混凝土松动或脱落。荷载继续增大,CFRP 布首先从中部裂缝处发生剥

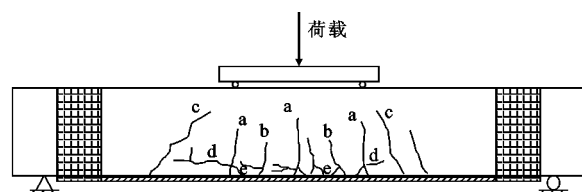


图 6 裂缝分布与发展特征

Fig. 6 Distribution and Development Characteristics of Cracks

离,剥离情况随着裂缝增加不断向两端发展。最终 CFRP 布完全与混凝土试件剥离,上部混凝土压碎。

试件底部混凝土受拉区产生次裂缝 e,由于混凝土与 CFRP 布之间局部黏结应力的存在,使得主裂缝之间的拉应力达到混凝土抗拉强度,在主裂缝之间产生次裂缝,由于黏结界面的局部黏结应力影响程度很小,所以次裂缝很短,并且以三角形的形状存在于试件梁底部。

试验发现冻融循环 300 次与冻融循环 150 次相比,前者产生了更多的次裂缝,如图 7 所示。文献[14]进行了 CFRP 布的抗冻融性能试验,经过 50 次和 100 次冻融循环后测试 CFRP 布的抗拉强度、弹性模量以及极限应变。试验结果中,进行 50 次和 100 次冻融循环的 CFRP 布抗拉强度分别下降了 2.1% 和 4.4%,弹性模量无明显变化。文献[15]中对浸渍树脂进行了 20 次冻融循环试验,温度在 -25~65 ℃ 范围内。结果表明冻融循环作用对浸渍树脂的拉伸强度影响比较小,甚至出现了强度提高现象。文献[12]研究了混凝土等级对 CFRP 加固混凝土抗冻性能的影响,采用 C30 和 C60 混凝土进行试验。结果表明,冻融循环作用导致表层嵌贴 CFRP-混凝土黏结性能降低的原因主要为冻融作用下混凝土的损伤和性能退化。

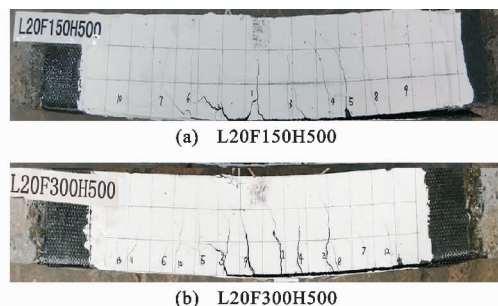


图 7 试验梁裂缝发展

Fig. 7 Cracks Development of Test Beams

本试验中,试件冻融循环 300 次产生更多次裂缝是为了真实模拟实际工程中梁的加固情况,在试验梁施加持续荷载前将钢筋混凝土梁进行预裂,从

而产生了部分裂缝,这种情况下进行冻融循环作用,使混凝土损伤更为严重。水经过冰冻后 1 mL 的体积膨胀到 1.2 mL,因此混凝土中毛细孔内的水膨胀,孔隙中的水会因为膨胀压力排除,当混凝土的抗拉强度小于此压力时,就会产生微小裂缝。经过连续冻融循环,融化后孔隙水继续冰冻膨胀,从而不断对混凝土造成损伤,在试验施加荷载时,细微裂缝逐渐变大,从而导致混凝土裂缝增加。

在相同持载和冻融循环次数下,经过湿热环境试验后,由于环氧树脂的胶层出现一定程度的老化,并且随着试验时间的增加,劣化程度越来越严重。如图 8(a),(b)所示,经过 500 h 湿热环境作用的试件,当 CFRP 布与混凝土试件发生剥离破坏后 CFRP 布上粘贴有较多的混凝土碎屑,并且试件梁底部受拉区三角形裂缝区域明显增多;经过 1 000 h 湿热环境作用的试件当剥离破坏后 CFRP 布上碎屑较少,混凝土试件表面较平整。黏结特征的变化说明湿热环境使环氧树脂黏结层发生劣化,并随着时间的增加,劣化程度越来越严重,同时也是使 CFRP 布与混凝土试件发生剥离破坏的主要原因。

在相同持载和湿热环境下,经过冻融循环之后,混凝土内部出现细微裂缝并且抗拉强度下降。如图 8(c),(d)所示,经过 500 h 湿热环境作用及 150 次和 300 次冻融循环作用的试件,在发生剥离破坏之后,两者 CFRP 布上黏结的混凝土碎屑基本相同,但是经过 300 次冻融循环后试件上的裂缝明显多于经过 150 次冻融循环后的试件。试验表明冻融循环对混凝土的损伤更大,使混凝土内部结构产生劣化,并随着冻融循环次数的增加,损伤程度逐渐增大。

2.2 试件受弯承载力分析

CFRP 布加固混凝土试件的极限荷载、屈服荷载(对应纵向受拉钢筋屈服时的荷载)、CFRP 布剥离时对应的荷载等参数的试验结果见表 5。试验结果表明,随着冻融循环次数和湿热时间的增加,CFRP 加固钢筋混凝土梁极限荷载、屈服荷载、剥离荷载均呈现下降趋势,其中试件的剥离荷载为屈服荷载的 1.1 倍~1.3 倍。

图 9 为各试验梁的极限荷载-持载等级曲线。由图 9 可以看出,对于相同冻融循环次数和湿热时间,持载 0 kN 和 10 kN 的试件承载能力相差不大,在 4 种环境下分别下降 0.1%,2.5%,0.6%,1.5%,原因为 10 kN 的持载对应于加固前混凝土梁承载能力的 30%,此时试件仍处于弹性工作范围,内部裂缝开展较少,外部环境对其侵蚀程度较



图 8 界面剥离效果

Fig. 8 Interfacial Debonding Effects

低。荷载由 10 kN 增加到 20 kN 后,4 种环境下极限承载力分别降低 3.3%,10.2%,5.2%,8.2%,承载能力较 10 kN 降低幅度增大。20 kN 的持载对应于加固前混凝土梁承载能力的 60%,在此种荷载的情况下,裂缝开展程度较大,并且 CFRP 布一直在受力状态,劣化较为严重。

F150H1000 和 F300H1000 所对应的曲线承载能力分别降低 10.2%和 8.2%,较相同冻融循环次数湿热 500 h 的承载力下降较大。因为温度升高和湿度增加都弱化了聚合物的力学性能^[16],从而不同程度地减弱了界面的相互作用,在受力状态下加速

表 5 各试件的主要试验结果

Tab. 5 Main Test Results of Specimens

| 试件编号 | 极限荷载/ kN | 屈服荷载/ kN | 剥离荷载/ kN | 跨中挠度/ mm |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | 43.0 | 28.94 | | 4.18 |
| L0F150H500 | 63.1 | 44.85 | 55.90 | 11.05 |
| L0F150H1000 | 60.1 | 44.42 | 54.67 | 9.76 |
| L0F300H500 | 57.7 | 44.17 | 53.90 | 9.73 |
| L0F300H1000 | 55.5 | 45.28 | 52.07 | 13.15 |
| L10F150H500 | 63.0 | 50.82 | 60.64 | 9.82 |
| L10F150H1000 | 58.7 | 46.32 | 59.72 | 13.40 |
| L10F300H500 | 57.4 | 44.50 | 55.07 | 10.57 |
| L10F300H1000 | 54.6 | 43.29 | 52.21 | 14.67 |
| L20F150H500 | 60.9 | 46.66 | 57.97 | 11.31 |
| L20F150H1000 | 52.7 | 46.58 | 51.48 | 12.17 |
| L20F300H500 | 54.4 | 45.42 | 52.24 | 9.72 |
| L20F300H1000 | 50.2 | 41.15 | 52.08 | 12.89 |

注:编号 0 为试验未加固试件。

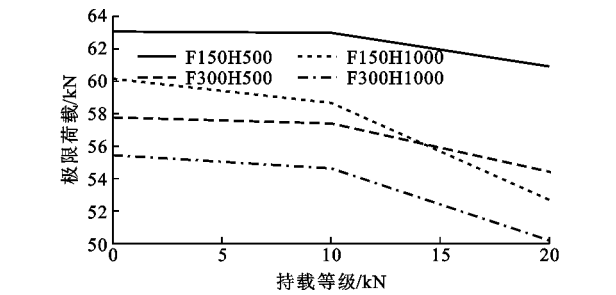


图 9 复杂环境作用下试件极限荷载-持载等级曲线
Fig. 9 Curves of Ultimate Load vs. Loading Grade of Specimens in Complex Environment

了此种劣化。同时试验表明在冻融 150 次和湿热 500 h 的基础上,继续湿热 500 h 对试件劣化产生的影响比继续冻融循环 150 次产生的影响大。

图 10,11 分别为复杂环境下试件极限荷载-冻融循环次数柱状图和极限荷载-湿热时长柱状图。由图 10,11 可知:相同冻融循环次数下,湿热环境对试件产生的影响比持载对试件产生的影响大;相同湿热时长作用下,冻融循环对试件产生的影响比持载对试件产生的影响大。由此可以看出在冻融循环 300 次以下、湿热时长 1 000 h 以下时,外部环境对试件产生的影响更为严重。

2.3 试件荷载及挠度分析

不同持载作用下的荷载-挠度曲线见图 12。由图 12 可以看出,所有试件的荷载-挠度曲线趋势基本一致,分为 3 个阶段:第 1 阶段为弹性阶段,此阶段中混凝土裂缝细微,并且与 CFRP 布黏结状态良好,钢筋同样处于弹性状态,此阶段曲线的斜率有明

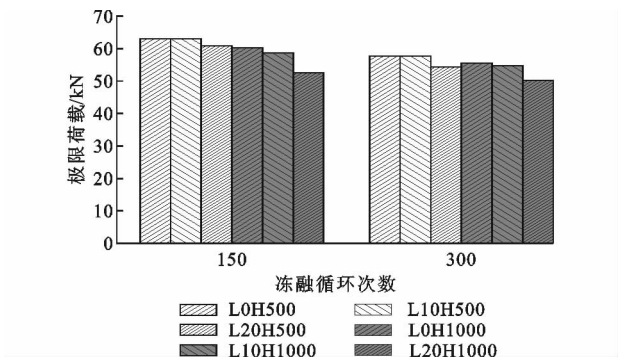


图 10 复杂环境作用下试件极限荷载-冻融循环次数柱状图
Fig. 10 Histograms of Ultimate Load vs. Freezing-thaw Cycles of Specimens in Complex Environment

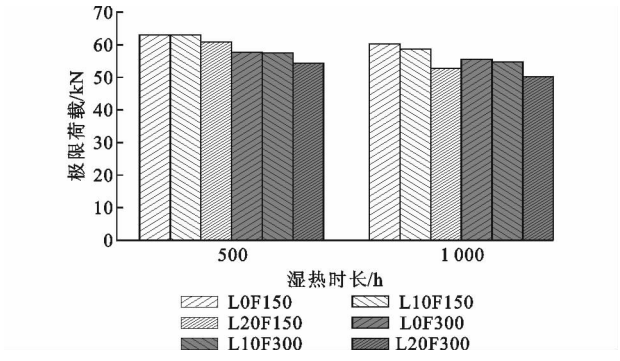


图 11 复杂环境作用下试件极限荷载-湿热时长柱状图
Fig. 11 Histogram of Ultimate Load vs. Hydrothermal Time of Specimens in Complex Environment

显的转折点,在转折点之后由于钢筋屈服,CFRP 布主要承受试件底部产生的拉力;第 2 阶段为 CFRP 布剥离阶段,随着荷载的增加,混凝土试件裂缝不断扩展,裂缝之间 CFRP 布与混凝土梁的黏结应力迅速增大,直至两者剥离;第 3 阶段为试件破坏阶段,随着裂缝的发展,剥离由中部向两端延伸,直至完全剥离,仅由 U 形箍将 CFRP 布与混凝土试件相连,下部混凝土与钢筋完全失效,拉力仅由 CFRP 承担,最终上部混凝土被压碎,试件完全丧失承载能力。

由图 12 还可以看出,在相同环境作用下,所施加持续荷载越大,试件挠度越大,刚度越小,并且随着环境的不断恶化,持载带来的影响越来越小。产生此种现象的原因是持载使试件产生细微裂缝,加速了 CFRP-混凝土黏结界面的劣化,在荷载作用下更容易发生剥离破坏;随着冻融循环次数、湿热时长的增加,持载对黏结界面的影响越来越小,所以在更恶劣的环境下,不同持载作用的试件刚度相差不大。

持载等级为 0 kN 的各试件在不同环境作用下的荷载-挠度曲线见图 13。由图 13 可以看出:没有

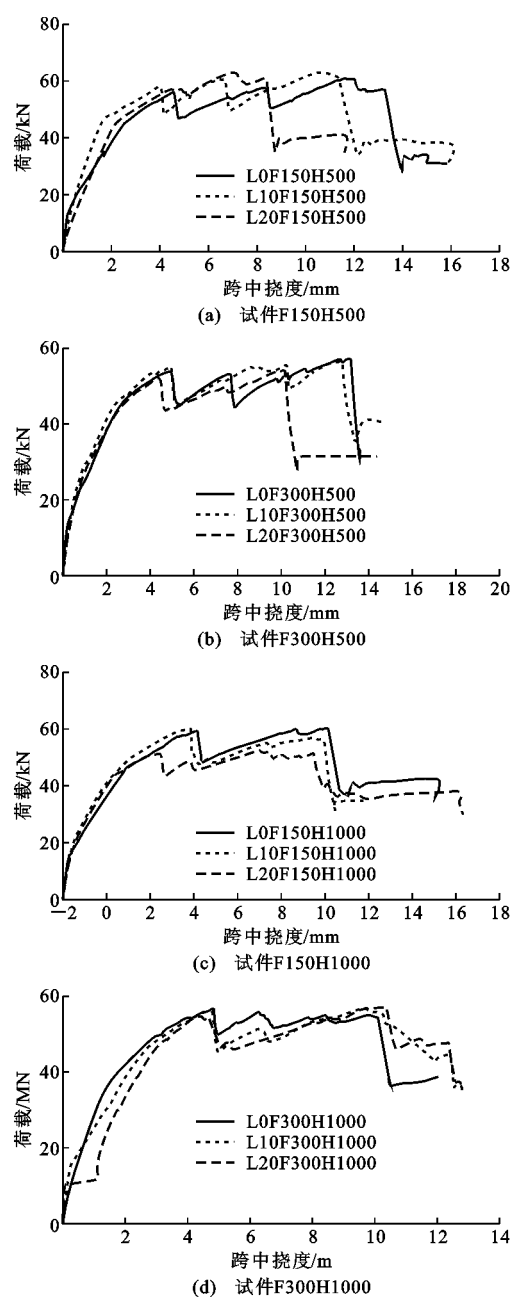


图 12 不同持载作用下 CFRP 加固高强钢筋混凝土
荷载-挠度曲线

Fig. 12 Curves for Load-deflection of CFRP Reinforced
RC Beams with Different Sustain Loads

任何环境作用的试件承载能力最高,并且在相同荷载作用下挠度最小;既经受冻融循环,又经受湿热环境作用的试件承载能力最低,并且相同荷载作用下挠度最大。试验表明,湿热 500 h 的试件承载力小于冻融循环 150 次的试件承载力,大于湿热 500 h 且冻融循环 150 次的试件承载力。因此,冻融循环和湿热环境的作用使得 CFRP 混凝土试件受到不同程度的黏结劣化,温度 40°、湿度 98% 对试件造成的劣化影响大于冻融循环 150 次。

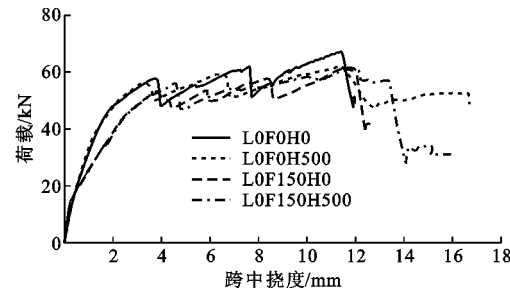


图 13 不同环境作用下 CFRP-高强混凝土荷载-挠度曲线
Fig. 13 Curves for Load-deflection of CFRP Reinforced
RC Beams in Different External Environments

由试验分析可知,冻融循环主要对混凝土产生损伤从而对结构产生影响,湿热环境使黏结界面老化蠕变从而使结构丧失原有功能^[17]。本试验中采用 C60 混凝土,温度 40°,湿度 98%。对高强混凝土而言,冻融循环对其产生的损伤较小,而湿热环境因为作用于黏结树脂,故对试件造成的劣化影响较大。

2.4 CFRP 布受力分析

CFRP-高强混凝土试件的荷载-CFRP 应变关系曲线见图 14,其中应变为试件跨中 CFRP 布上粘贴应变片的实测应变。

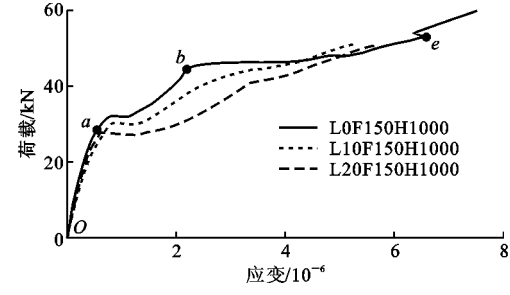


图 14 不同环境下试件荷载-CFRP 应变曲线
Fig. 14 Load-CFRP Strain Curves of Specimens in
Different Environments

由图 14 可知,随着荷载的增加,曲线发展可以分为 Oa, ab, be 三阶段,对应的加载过程分为试件开裂前弹性阶段、试件开裂后至钢筋受拉屈服阶段、受拉钢筋失效至最终破坏阶段。Oa 段试件整体呈线性关系,底部拉力由钢筋和 CFRP 布协同承担,CFRP 布应变发展缓慢;ab 段斜率变小,在中部出现一段平直段,说明随着荷载的增加,裂缝发展迅速,钢筋已经开始屈服,逐步退出工作状态,并且 CFRP 布应变发展加快,底部受拉区增加的拉应力主要由 CFRP 布承担。破坏阶段随着裂缝的发展,裂缝间 CFRP 布与混凝土的黏结应力不断增大,从而使两者产生剥离,此时底部拉应力完全由 CFRP 布提供,其应变增加速度相应加快。

由图 14 还可知,在相同环境、不同持载作用下,

在 Oa 段中应变发展状态相差不大,在 ab 段中应变变化逐渐明显。 ab 段中相同荷载作用下,持载等级越大,CFRP 布的应变越大。试验表明,在相同环境作用下,持载加速了 CFRP 布与混凝土之间的黏结劣化。

因为 CFRP 和树脂的热膨胀系数不相同,在温度作用下,CFRP 与黏结树脂的界面会出现温度应力,并且这个应力随着温度的变化而发生变化。同样,由于 CFRP 与树脂吸水膨胀程度不相同,从而使界面产生相应的湿度应力。试验中温度应力和湿度应力使界面产生细微裂缝,裂缝的出现又会为水和温度对界面的侵蚀提供通道,使界面破坏过程加速。本试验中试件在湿热环境作用的同时还有持续荷载的作用,在黏结界面会产生持载应力,此力远远大于温度应力和湿度应力,三者共同作用于黏结界面。文献[18]指出,黏结树脂在长期负载的情况下,往往产生蠕变。蠕变使 CFRP-混凝土结构的黏结界面缓慢变形,随着时间增加,最终导致黏结结构失去原有形态而丧失原有功能。文献[19]~[26]试验结果表明,温度变化强烈影响聚合物材料的蠕变过程。随着温度的升高,基体分子热运动能量和自由体积都会增加,从而导致各运动单元松弛的时间缩短,基体蠕变随之变大。因此,在温度应力、湿度应力、持载应力共同作用下,黏结树脂的蠕变老化成为最终试件剥离破坏的关键。

3 结 语

(1)相同环境作用下,持续荷载使得试件极限承载力降低,并且随着持续荷载的增加,试件承载力降低越来越快。经受 150 次冻融循环、湿热 1 000 h 作用时,持续荷载为 30%,60%的试件承载能力分别下降 2.5%,10.2%,持续荷载会加速劣化混凝土试件的抗弯性能。

(2)相同持续荷载、不同冻融循环次数和湿热环境下,作用环境越恶劣,承载能力越大,刚度越小。

(3)温度 40°、湿度 98%的湿热环境下 500 h 与冻融循环 150 次相比,湿热影响对试件的劣化程度更为显著。

(4)在冻融循环 300 次以下和湿度 98%、温度 40°、湿热时长 1 000 h 以下时,与持续荷载相比,外部环境对试件产生的影响更为严重。

参考文献:

References:

[1] 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 Qing-rui, YANG Yong-xin, GUO Chun-hong, et al. Relationship Between Accelerated and Outdoor Exposure Experiment Results of Saturating Resin[J]. Industrial Construction, 2006, 36(8): 1-5.

[2] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京:清华大学,2004.

LU Xin-zheng. Studies on FRP-concrete Interface [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[3] ABANILLA M A, LI Y, KARBHARI V M. Durability Characterization of Wet Layup Graphite/Epoxy Composites Used in External Strengthening[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(2/3): 200-212.

[4] 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.

[5] LALUMERA G M, CALAMARI D, GALLI P, et al. Preliminary Investigation on the Environmental Occurrence and Effects of Antibiotics Used in Aquaculture in Italy[J]. Chemosphere, 2004, 54(5): 661-668.

[6] KLAMER E L, HORDIJK D A, JANSSEN H J M. The Influence of Temperature on the Debonding of Externally Bonded CFRP [J]. ACI Special Publication, 2005, 230: 1551-1570.

[7] 姚健鹏. 湿热环境下 CFL-混凝土界面耐久性实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

YAO Jian-peng. Experimental Study on Durability of the Interface Between CFL and Concrete Under Wet-thermal Condition [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[8] SUBRAMANIAM 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.

[9] 李晓艳. FRP 拉挤制品用环氧树脂基体的湿热耐久性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

LI Xiao-yan. Hygrothermal Durability of Epoxy Resin Matrices Used for FRP Pultruded Composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[10] 陈凤山,赵国藩,王兆忠. CFRP 加固损伤钢筋混凝土梁的性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25 (4): 116-122.

- CHEN Feng-shan, ZHAO Guo-fan, WANG Zhao-zhong. Test on Performance of Damaged RC Beams Strengthened with CFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 116-122.
- [11] ANDRA H P, MAIER M. Post-strengthening with Externally Bonded Prestressed CFRP Strips[R]. Lucerne; IABSE, 2000.
- [12] 彭 晖, 刘 洋, 付俊俊, 等. 冻融循环作用下表层嵌贴 CFRP-混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2017, 44(5): 63-72.
- PENG Hui, LIU Yang, FU Jun-jun, et al. Experimental Study of Bond Between Near-surface Mounted CFRP Strips and Concrete Under Freeze-thawing Cycles[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2017, 44(5): 63-72.
- [13] 辛东嵘. 湿热环境中环氧树脂力学性能和界面破坏机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- XIN Dong-rong. Mechanical Properties and the Interface Failure Mechanism of Epoxy Resin Under Hygrothermal Condition [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [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 Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [15] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性试验研究[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.
- [16] 李永德, 朱 明. FRP 加固修复混凝土用粘结材料的研究(2)浸渍树脂[J]. 绿色建筑, 2001(5): 29-32.
- LI Yong-de, ZHU Ming. Study of Adhesive Used for Strengthening Concrete Structure with FRP — Part 2 Impregnated Resin[J]. Green Building, 2001(5): 29-32.
- [17] 张 军, 张永祥, 杨 军. 环氧树脂胶湿热与室温环境下的蠕变行为研究[J]. 机械强度, 2015, 37(2): 237-242.
- ZHANG Jun, ZHANG Yong-xiang, YANG Jun. Investigation on Epoxy Creep Behaviors at Ambient and Hygrothermal Environment[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(2): 237-242.
- [18] 关长斌, 赵玉成, 陆文明. CG 混合纤维/橡胶复合材料的黏弹性[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 75-79.
- GUAN Chang-bin, ZHAO Yu-cheng, LU Wen-ming. Viscoelasticity of CG Mixed Fiber/Rubber Composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 75-79.
- [19] LORENZIS L D, MILLER B, NANNI A. Bond of Fiber-reinforced Polymer Laminates to Concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(3): 256-264.
- [20] 刁 波, 孙 洋, 叶英华. 持续承载钢筋混凝土梁的冻融循环试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(3): 785-790.
- DIAO Bo, SUN Yang, YE Ying-hua. Experiments of Persistent Loading Reinforced Concrete Beams with Freeze-thaw Cycles[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(3): 785-790.
- [21] BIZINDAVYI L, NEALE K W. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(4): 153-160.
- [22] DUTTA P K, HUI D. Low-temperature and Freeze-thaw Durability of Thick Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 1996, 27(3/4): 371-379.
- [23] CHOI S, GARTNER A L, ETEN N V, et al. Durability of Concrete Beams Externally Reinforced with CFRP Composites Exposed to Various Environments [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 16(1): 10-20.
- [24] 付俊俊, 彭 晖, 莫永祥, 等. 冻融循环和界面持续应力作用下 CFRP-混凝土界面的粘结性能研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(9): 98-102, 93.
- FU Jun-jun, PENG Hui, MO Yong-xiang, et al. Bond Performance Study of CFRP-concrete Interface Under Freeze-thaw Cycling and Sustained Interfacial Stress [J]. Building Structure, 2015, 45(9): 98-102, 93.
- [25] 施嘉伟. 多因素耦合作用下 FRP 加固混凝土结构的耐久性能与可靠性设计[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- SHI Jia-wei. Durability and Reliability Design of FRP Strengthened Concrete Structures Under Coupled Effects of Multi-factors[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [26] ABANILLA M A, LI Y, KARBHARI V M. Durability Characterization of Wet Layup Graphite/Epoxy Composites Used in External Strengthening[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37(2/3): 200-212.