

# 温湿交替对外贴 CFRP 加固混凝土梁 抗弯力学性能的影响研究\*

李伟文 严志亮 隋莉莉 邢 锋 曹征良

(深圳市土木工程耐久性重点实验室 深圳大学 广东深圳 518060)

**摘 要:** 温湿交替是造成碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢筋混凝土梁性能退化的主要原因之一。通过试验 研究在温湿交替下碳纤维增强复合材料加固钢筋混凝土的力学特性,并观察其裂缝开展情况;在此基础上分析碳纤维增强复合材料加固钢筋混凝土梁在温湿交替条件下的破坏模式。试验结果与正常环境下的测试数据进行对比,得出了温湿交替对 CFRP 加固钢筋混凝土梁的影响程度和劣化机理。

**关键词:** 碳纤维布; 温湿交替; 混凝土梁; 力学特性; 劣化机理

## THE INFLUENCE OF TEMPERATURE-HUMIDITY CYCLES ON BENDING MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY CFRP

Li Weiwen Yan Zhiliang Sui Lili Xing Feng Cao Zhengliang

(The Key Lab on Durability of Civil Engineering in Shenzhen, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The temperature-humidity cycle's action is one of major factors, which causing the deterioration of concrete structures, especially in the high temperature-humidity areas of the south of China. In this study, the influence of temperature-humidity cycles on mechanical behavior of concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced plastics is explored, and crack phenomena are observed of concrete beams based on the fast temperature-humidity tests. Moreover, the destructive pattern of concrete beams strengthened by CFRP with the temperature-humidity cycle's action is analyzed. The test results are compared with experimental data under normal environmental condition, by which the deterioration mechanism of mechanical properties, and influenced degree of concrete structures strengthened by CFRP with temperature-humidity cycle's action are obtained.

**Keywords:** CFRP; temperature-humidity cycles; concrete beam; mechanical properties; deterioration mechanism

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer-Plastic, FRP)用于钢筋混凝土结构补强加固的应用及相关研究的热潮可追溯到 20 世纪 80 年代初期,始于美、日等发达工业国家。近十年来,美、日、欧的科研机构 and 材料生产厂家都进行了大量 FRP 用于加固补强钢筋混凝土结构的研究应用工作,并编写了相关的 FRP 加固技术规程和标准<sup>[1-2]</sup>。

我国是在 20 世纪 90 年代引进该项技术并正式开始对 FRP 进行研究,并制订了相关的结构设计、施工的技术规程<sup>[3]</sup>。但规程只针对 FRP 加固混凝土结构的力学性能设计和施工作了规定,并未涉及耐久性能范畴的技术要求。国外一些试验结果表明:FRP 本身在各种环境条件下有良好的耐腐蚀性,可以抵抗建筑物常遇到的酸、碱、盐及大气腐蚀作用,而且也有较好的耐疲劳性能<sup>[4-7]</sup>。虽然 FRP 材料具有比较高的耐久性能,但是 FRP 加固混凝土结

构是由多种材料共同结合而成,决定加固后整体结构的耐久性还需考虑被加固的钢筋混凝土结构、粘结树脂以及加固后整体构件的耐久性能。关于外贴 FRP 加固钢筋混凝土构件的耐久性能,国外的学者在硫酸盐腐蚀、冻融循环、干湿循环、紫外线照射等恶劣环境下的加固构件作了许多有益的研究和探索,试验结果表明,在这些恶劣环境下,FRP 外贴加固构件的整体力学性能都有不同程度的影响<sup>[8-10]</sup>。

在国内,FRP 加固钢筋混凝土梁结构的耐久性研究尚处于起步阶段。在一些科研机构进行了一些

\* 国家自然科学基金资助项目(50878130);深圳市科技计划资助项目(SY200806270091A);建设部研究开发项目(2008-K2-25)。

第一作者:李伟文,男,1967 年出生,副教授。

E-mail:liweiw@szu.edu.cn

收稿日期:2009-08-07

初步的研究<sup>[11-13]</sup>。而且由于尚未建立一套与实际环境条件体系相一致的试验方法,没有统一的研究标准和规范,使不同的研究人员获得试验数据不具有可比性,且感性结论较多,尚未涉及对其力学性能变化的破坏机理做出深刻分析<sup>[14]</sup>。

本文针对沿海地区温湿交变的特点,采用室内人工加速劣化的方法,探讨劣化温湿交变环境下碳纤维增强复合材料(CFRP)外贴加固钢筋混凝土梁的抗弯力学性能和破坏模式,并初步探讨其退化机理。

## 1 试验方案概述

本研究是系列劣化因素研究中的一部分,共采用5根试验梁,混凝土设计强度等级为C30,截面尺寸110 mm×210 mm,全长1 300 mm,净跨1 300 mm。纵向配筋2φ8,纯弯段不配箍筋。使用上海某公司生产CFRP布条(宽度为100 mm)、底胶和粘接胶作为加固材料,梁底外贴2层CFRP条带,无U型CFRP条带锚固。各梁的编号及主要加固技术参数见表1。

表1 试验梁详细信息

Table 1 Experimental detail of specimens

梁编号	劣化时间 (天数/循环次数)	加固情况	备注
B2-CT-0	0/0	—	对比梁
B2-CT-2	0/0	2层CFRP,无U型箍	加固未劣化
B2-TH-30	30/60	2层CFRP,无U型箍	
B2-TH-45	45/90	2层CFRP,无U型箍	
B2-TH-65	65/130	2层CFRP,无U型箍	

试验采用室内人工模拟温湿交变的劣化试验环境,每次循环包括:1)高温高湿(温度40℃,湿度98%),持续6h。2)低温无湿(温度-5℃,湿度0%),持续时间6h 2次/1d。

试验梁在环境模拟箱中劣化到达计划时间后,将其从试验箱中搬出来,然后置于风扇下风干24h后进行抗弯性能试验。采用三分点加载方式,以保证中间试验段为纯弯受力,如图1所示。试验时分级加荷,加载初期,逐级荷载为4kN;梁开裂后,逐级荷载为2kN。在试验过程中重点量测包括劣化前后梁跨中界面的平均应变、弯曲裂缝的形态及发展、受拉钢筋及碳纤维布的应变、受压混凝土应变、裂缝开展情况、跨中及加载点随荷载挠度变化曲线。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土抗压强度

为了探讨温湿交变作用后混凝土强度的变化情

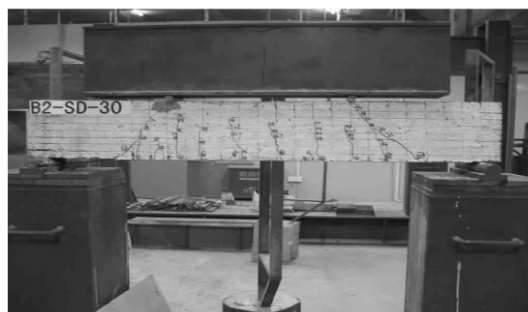


图1 劣化后加固梁的抗弯承载力试验

Fig. 1 Bending test of RC beam strengthened with CFRP after T-H cycle's action

况,分别测试了经过0,60,90,130次温湿交变循环作用后的混凝土立方体抗压强度。经过温湿交变循环后,混凝土立方体试件的外观能保持完好,并无明显的变化。在劣化初期(30d),混凝土的强度不仅不减少,反而强度提高了1.6%。原因是标准养护后的混凝土后期强度仍然在缓慢增长,其强度增长的幅度大于劣化环境所造成的强度损失。随着劣化时间的增加,混凝土强度呈现了逐步下降的趋势。经过130次循环后,混凝土抗压强度降低了3%(表2)。试验结果表明,温湿交变对混凝土自身强度有一定的影响,会导致强度的退化。

表2 温湿交变循环后混凝土抗压强度

Table 2 Compressive strength of concrete after T-H cycle's action

试验条件	混凝土立方体抗压强度		
	$F_{CC}$ /MPa	$f_{DC}$ /MPa	$H$
室温	68.1	—	1.000
温湿交变60次	—	69.2	1.016
温湿交变90次	—	67.0	0.984
温湿交变130次	—	66.0	0.969

注: $f_{CC}$ 为同时浇筑但未受环境作用的立方体混凝土试块抗压强度; $f_{DC}$ 为经过温湿交变循环作用后的立方体混凝土试块抗压强度;环境劣化影响系数 $\eta=f_{DC}/f_{CC}$ 。

### 2.2 受弯承载力

表3列出了经过温湿交变作用前后FRP加固钢筋混凝土梁受弯承载力的试验结果。可以看出,外贴CFRP加固后,试验梁的开裂荷载和极限荷载均有所增加,其中未有劣化的梁极限荷载的增长最为显著,粘贴2层CFRP后,梁的开裂荷载和极限荷载比未加固梁分别提高了35.7%和114.6%。可见,采用CFRP加固钢筋混凝土梁可有效提高其抗裂性能及极限抗弯强度。

随着劣化时间的增长,CFRP加固梁的开裂荷载和极限荷载呈现递减趋势。没有劣化的加固梁开

裂荷载和极限荷载分别为 38.0, 88.0 kN, 经过 65 d 的温湿交变后, 加固梁的开裂荷载和极限荷载分别降为 32.0, 60.0 kN, 降幅分别达到了 15.8% 和 31.8%。因本试验的加固设计方案中均未设 U 型 CFRP 锚固条, 因此, 试验梁最后均发生 CFRP 剥离的破坏形式, 界面的粘结强度在梁的破坏中起到了

决定作用。温湿交变使得混凝土的强度降低, 树脂的粘结能力下降, 导致 CFRP 与混凝土界面粘结强度降低。因此, 混凝土强度和粘结树脂在温湿交变试验后性能下降是造成 CFRP 加固钢筋混凝土梁开裂荷载和极限抗弯强度下降的最主要因素。

表 3 温湿交变环境下试验梁的受弯力学结果

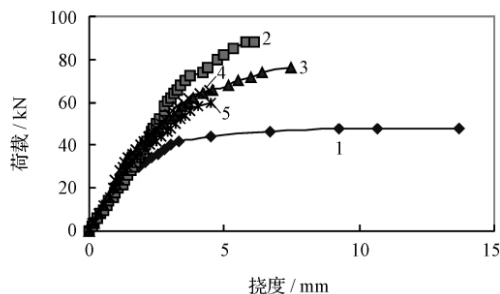
Table 3 Bending test results of RC beams after T-H cycle's action

梁编号	劣化时间 / d	开裂荷载 /kN		极限荷载 /kN		挠度 / mm	破坏模式
		试验值	提高程度 <sup>1)</sup>	试验值	提高程度 <sup>1)</sup>		
B2-CT-0	0	28.0	—	41.0	—	13.70	受拉钢筋屈服破坏
B2-CT-2	0	38.0	35.7%	88.0	114.6%	6.13	CFRP 端部剥离破坏
B2-TH-30	30	36.0	28.6%	76.0	85.4%	7.48	CFRP 端部剥离破坏
B2-TH-45	45	32.0	14.3%	68.0	65.9%	4.43	CFRP 端部剥离破坏
B2-TH-65	65	32.0	14.3%	60.0	46.3%	4.49	CFRP 端部剥离破坏

注 1) 提高程度是各试验梁相对于对比梁 B2-CT-0 梁而言的。

### 2.3 跨中挠度

比较各级荷载下试验梁跨中挠度变化规律, 可以进一步了解 CFRP 参与受力情况及温湿交变对梁受力影响的程度。图 2 为各试验梁在加载过程中荷载-跨中挠度变化曲线。



1—B2-CT-0; 2—B2-CT-2; 3—B2-TH-30;  
4—B2-TH-45; 5—B2-TH-65

图 2 试验梁劣化前后荷载-挠度曲线

Fig. 2 Load-deflection curves of specimens before and after T-H cycle's action

试验表明, 在加载初期, 各试验梁的挠度呈线性变化, 且相差不大。这主要是因为梁受力较小, 受拉区应变不大, 此时加固梁中粘贴的碳纤维布尚未有效发挥。受拉区混凝土开裂后, 尤其纵筋屈服后, 对比梁 (B2-CT-0) 的挠度急剧增加, 破坏时挠度达到 13.695 mm。试验梁 B2-CT-2 (2 层 CFRP 加固, 未劣化), 挠度明显小于对比梁 B2-CT-0, 仅为 6.125 mm, 降低幅度达 55.3%。可见 CFRP 有效地参与受力过程, 显著提高试验梁正截面抗弯能力, 但同时也使梁的延性大大降低。这在 Hau (1999) 的试验也证明了这个结果<sup>[15]</sup>。因此, 采用 FRP 抗弯加固混凝土梁具有两个明显的特点: 1) 受弯承载

力提高。2) 延性下降。滕锦光等人的专著中对这个问题有类似的分析和结论<sup>[16]</sup>。

对于经温湿交变劣化后的梁, 在初期受弯弹性阶段内, 跟加固但未劣化梁 B2-CT-2 的变形非常接近。当荷载大于梁的开裂荷载时, 劣化的加固梁的挠度与未劣化的加固梁渐渐产生差异。当荷载达到各自的极限荷载时, 劣化后试件梁的极限挠度比未劣化的要小, 劣化 65 d 的试验梁 B2-TH-65 的挠度仅为 4.490 mm, 比梁 B2-CT-2 的挠度降低了 26.7%。试验结果表明, 温湿交变进一步降低了 CFRP 加固钢筋混凝土梁的延性, 使梁破坏更显脆性特征。分析其原因, 温湿交变环境使得混凝土强度和粘结胶的粘结能力进一步降低, 从而导致 CFRP 与混凝土界面的剥离破坏在更低的荷载值下发生, 但这个极限荷载值仍比未加固的对比梁的极限荷载值高。

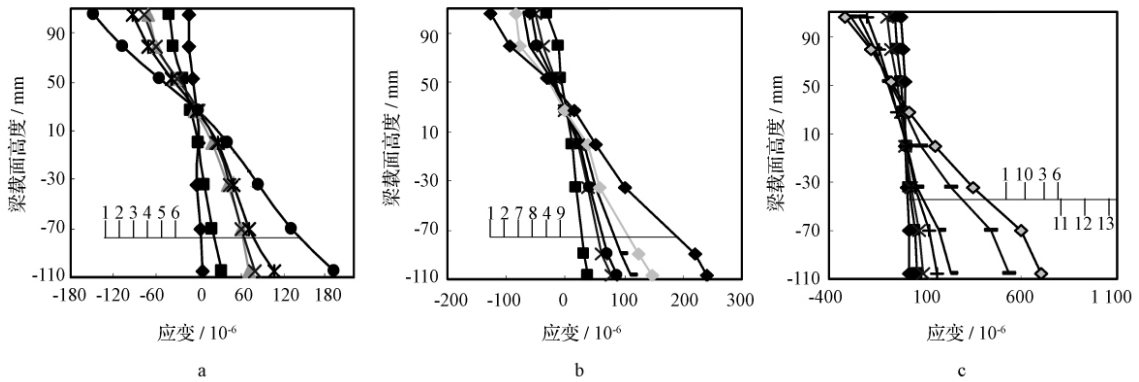
### 2.4 梁截面平均应变

在 CFRP 加固钢筋混凝土梁分析和计算过程中, 平截面假定是一个最重要的基本假定。图 3 为对试验梁在加固后劣化、加固未劣化与未加固未劣化 3 种情况下的梁截面应变分布图。从图中可以看出, 沿梁高布置的 8 个应变片在荷载初期测得的每级荷载下的应变值的分布基本上符合平截面假定。而且, 当受拉区出现裂缝后, 中性轴也随着荷载增加而升高。在 CFRP 没有剥离之前, CFRP 的应变基本与梁底混凝土基本相同。

从试验测得的应变数据分析, CFRP 外贴加固技术, 温湿交变劣化作用虽然使混凝土梁的某些力学性能发生了变化, 但对于应变的分布规律仍然满

足材料力学中的平截面假定的。因此,在进行劣化加固梁的相关力学性能计算过程中,仍可以把平截

面假定作为一个基本假定。



a—B2-CT-0 梁;b—B2-CT-2 梁;c—B2-TH-45 梁  
1—4 kN;2—10 kN;3—20 kN;4—22 kN;5—26 kN;6—30 kN;7—14 kN;8—18 kN;  
9—28 kN;10—12 kN;11—32 kN;12—34 kN;13—36 kN;

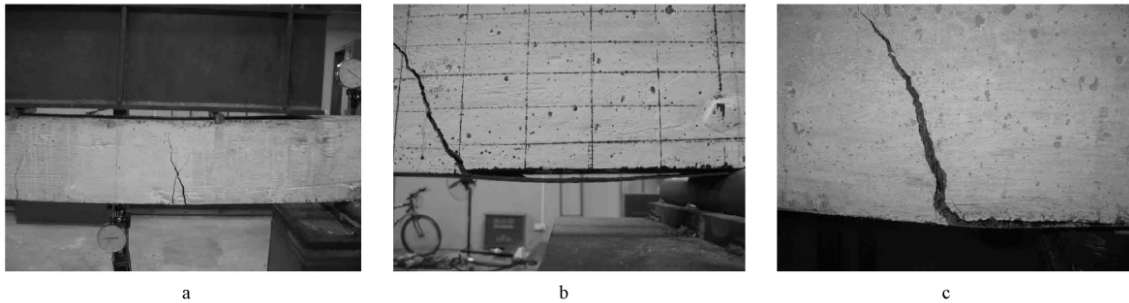
图3 梁截面平均应变分布

Fig.3 Distribution of mean-strain of specimens

## 2.5 破坏模式

外贴 CFRP 加固混凝土梁除了提高梁的极限受弯荷载能力,降低梁的延性外,同时还使混凝土的破坏模式发生变化。图4 分别给出了未加固梁(B2-CT-0)、未劣化加固梁(B2-CT-2)和劣化45 d 加固梁(B2-TH-45)三者典型破坏后的照片。从照片和试验过程分析,未加固梁是因为受拉钢筋屈服

而达到极限承载力,属于适筋梁的正常破坏模式(图4a)。而另外2个试件梁则是因为 CFRP 与混凝土之间的界面剥离导致梁的最终破坏(图4b、图4c)。虽然本研究中 CFRP 加固后的试验梁最终均发生 CFRP 剥离破坏,但从整个试验过程分析,仍有以下几点值得关注:



a—B2-CT-0 梁弯曲破坏;b—B2-CT-2 梁端部剥离破坏;c—B2-TH-45 梁端部剥离破坏

图4 不同条件下试验梁的破坏模式

Fig.4 Failure modes of specimens in different testing condition

1) CFRP 加固梁在发生最终的剥离破坏前,纯弯段内均产生一条斜向上发展的主裂缝(图4、图5)。正是由于这条主裂缝的快速发展,开裂界面混凝土释放的拉应力几乎全部传递到 CFRP 上,导致裂缝附近 CFRP 和混凝土之间局部界面的应力迅速增大。当这个不断加大的界面应力达到粘结面的最大粘结强度时,将导致 CFRP 剥离。

2) CFRP 的剥离现象首先发生在 CFRP 粘结面的端部,主要是端部应力集中的缘故。当端部出现剥离情况后,剥离现象迅速传至整个粘结面,导致混

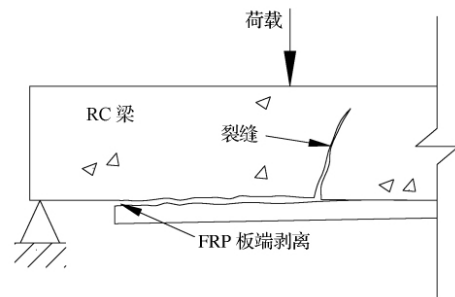


图5 梁的剥离破坏

Fig.5 Debonding failure mode of RC beam

混凝土梁的最终破坏。所以发生 CFRP 剥离现象的梁的破坏均表现出较大的“突然性”。

3) 由于整体试验计划的安排,本研究的试验梁均未布置 U 型 CFRP 条带起锚固作用。但是其他试验结果显示(将在另外的文章中论述),即使加了 U 型条带锚固,由于截面梁的高度有限,可能导致锚固长度不足,仍有机会引起 CFRP 剥离破坏的发生。这种情况下,可以认为 CFRP 尚未充分发挥其抗拉

强度,梁就因 CFRP 的剥离而破坏。

## 2.6 裂缝发展分析

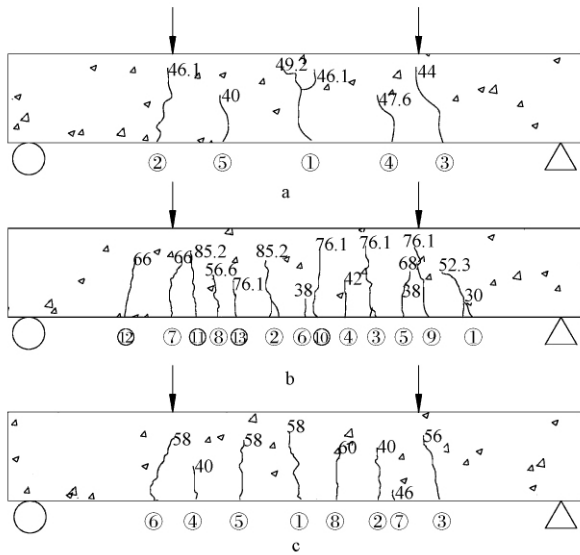
粘结碳纤维布劣化前后对混凝土开裂的抑制作用测试结果可见表 4。试验结果发现试验梁经碳纤维布加固后,裂缝条数明显增多,裂缝间距变小。而经过劣化后的加固梁,裂缝数目随着劣化时间而减少,主要因为混凝土经劣化后抗拉强度降低,且 CFRP 的粘结强度降低,减弱了对混凝土抗裂性能。

表 4 梁在劣化前后的裂缝开展情况

Table 4 Cracking in progress of specimens before and after T-H cycle's action

试件编号	劣化时间/d	加固情况	裂缝数量	第 1 条裂缝位置	裂缝最大间距/cm	裂缝最小间距/cm
B2-CT-0	—	未加固	5	纯弯段	30	10
B2-CT-2	—	2 层 CFRP	13	纯弯段	10	3
B2-TH-30	30	2 层 CFRP	13	纯弯段	12	3
B2-TH-45	45	2 层 CFRP	12	纯弯段	13	4
B2-TH-65	65	2 层 CFRP	8	纯弯段	14	4

图 6 为未加固梁、加固梁和劣化 65 d 后裂缝开展示意图,由图中可以看出,裂缝几乎都分布于梁的受弯段。梁在加固后,由于受弯提高而抗剪不足,在剪弯段出现较宽的裂缝。

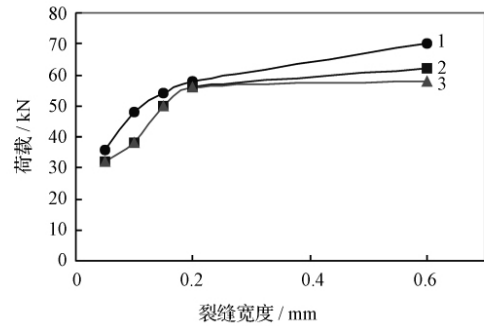


a—B2-CT-0; b—B2-CT-2; c—B2-TH-65

图 6 裂缝开展示意

Fig.6 Diagram of cracking in progress of specimens

加固梁在加载试验过程中,用刻度放大镜对梁中纯弯段中发展最快的裂缝进行了观测。图 7 为在不同荷载下劣化梁的裂缝宽度,随着劣化程度增加,在相同荷载下,梁的裂缝就越宽,由此可以看出,温湿交变使得 CFRP 对混凝土弯曲裂缝的抑制作用降低。



1—B2-TH-30; 2—B2-TH-45; 3—B2-TH-65

图 7 不同荷载下劣化梁的裂缝开展宽度

Fig.7 Width of crack of the degraded RC beams in various loading degrees

## 3 结论

本文通过模拟劣化环境,进行加速劣化试验,研究了 CFRP 加固钢筋混凝土梁在温湿交变下的力学性能,得出如下结论:

1) 无劣化条件下,CFRP 布加固钢筋混凝土梁抗弯性能提高明显,抗裂性能及极限受弯承载力显著提高。U 型箍对 CFRP 粘结端部的锚固可以有效地避免剥离破坏的发生,使梁的破坏模式由剥离破坏转为 CFRP 拉断破坏。

2) CFRP 加固钢筋混凝土梁时,可以有效地限制混凝土的裂缝开展,减小裂缝宽度,提高钢筋混凝土梁的截面刚度,但是会降低梁的延性。

3) 温湿交变降低混凝土的抗压强度,会降低 CFRP 加固钢筋混凝土梁的开裂荷载和极限荷载,经过 65 d 的劣化,加固梁的开裂荷载和极限承载力分别降低了 15.8% 和 31.9%。劣化会使 CFRP 加

固梁延性降低,增大弯曲裂缝的宽度。可见温湿交变对梁劣化明显。

4)经温湿交变劣化加固梁的界面平均应变仍符合平截面假定,CFRP与受拉钢筋的应变跟未劣化梁有相同的发展规律。

#### 参考文献

- [1] ACI Committee—440F Guidelines for the Selection, Design and Installation of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Systems for Externally Strengthening Concrete structures [S].
- [2] Machida. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, JSCE [G] // Concrete Engineering Series 23, Japanese Society of Civil Engineers. Tokyo, Japan: JSCE, 1997.
- [3] CECS 146:2003 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程 [S].
- [4] Nishizaki I, Labossière P, Sarsaniuc B. Durability of CFRP Sheet Reinforcement Through Exposure Tests, [C] // 7th International Symposium Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Michigan: American Concrete Institute, 2005, 10: 1419 - 1427.
- [5] Arockiasamy A AMER A, Shahawy M. Environmental and Long-Term Studies on CFRP Cables and CFRP Reinforced Concrete Beams [C] // 1st International Conference on Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction. Sherbrooke: 1998, 8: 599 - 622.
- [6] Bank L C, Gentry T R. Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects [J]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1995, 14(7): 558 - 587.
- [7] Steckel G L, Hawkins G F, Bauer J L. Environmental Durability of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Columns, Fiber Composites in Infrastructure [C] // Proc. of the Second International Conference on Fiber Composites in Infrastructure, ICCI1998, Tucson Arizona, USA (2): 460 - 475.
- [8] Houssam Toutanji, Yong Deng. Strength and Durability Performance of Concrete Axially Loaded Members Confined with AFRP Composite Sheets [J]. Composites, 2002: 255 - 261.
- [9] Chajes M J, Thomson T A. Durability of Concrete Beams Externally Reinforced with Composite Fabrics [J]. Construction and Building Materials, 1995, 9(3): 141 - 148.
- [10] Houssam A T, William Gomez. Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Sheets [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19: 351 - 358.
- [11] 任慧韬,姚谦峰,胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 520 - 526.
- [12] 杨勇新,郭春红,才鹏. 紫外线对 CFRP 与混凝土粘结性能的影响 [J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 18 - 20.
- [13] 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, 2005, 33(3): 291 - 296.
- [14] 邓宗才,牛翠兵,杜修力,等. FRP 加固混凝土结构耐久性研究 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 133 - 137.
- [15] Hau K M. Experiments on Concrete Beams Strengthened by Bonding Fibre Reinforced Plastic Sheets. Master of Science in Civil Engineering Thesis [J]. The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [16] 滕锦光,陈建飞, S T Smith, 等. 加固混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

## · 信 息 ·

### 世界著名绿色建筑:德国节能住宅

现代建筑不仅仅只是应用现代建筑技术,而且还要体现生态环保,体现材料的美感、轻盈通透等方面,生态环保意味着建筑结构材料运用的越少越好,在建筑使用期间的能耗越少越好,而且所有建筑材料尽可能循环利用。建筑的轻盈减少材料的使用,有利于可持续发展;建筑的通透增加使用者同外界的对话,同时让自然光线更好的使用成为可能。德国索贝克公司设计的 R129 超级未来型节能住宅,引起了广泛关注。建筑外皮采用人工材料,质地极轻且通透,承力结构也是由中空的碳素材料构成。建筑外表皮镀有低辐射膜,夏天阻挡热辐射进入,冬天防止热能量流失。一个可开启关闭的电子镀铬膜能使建筑外壳分级变暗或者完全不透光。在建筑外皮结构的外表面上设置了超薄的光伏发电膜,它只遮挡 20% 的光线进入,但可以提供建筑所需绝大部分能源。

轻质碳素合成材料板作为承载地板,上面设有地暖板,冬天可根据温度需求进行自动控制,中间还设有一种智能地板,提供能量存储的可能性,以及电、水、新风和电信管线接头的安装空间。室内在各个不同的功能空间没有固定的分割。可移动的单元核心由卫生和厨房装置构成,围绕这个核心单元可以安排不同的功能房间,如书房,卧室等。这种核心单元是建筑外表皮包裹着的生活领域唯一封闭的空间。