

文章编号: 1674-599X(2022)02-0062-06

CFRP板加固混凝土结构不同方法的黏结性能比较

吕毅刚¹, 吴攀^{1,3}, 彭晖¹, 乔杰¹, 饶攀¹, 韩伟威²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088)

摘 要: 为比较水平嵌贴CFRP板与表面黏贴、表层嵌贴CFRP板加固混凝土结构的界面黏结性能, 采用单剪拔出试验, 分析各试件的黏结承载力、破坏模式、CFRP应变分布及加载端部滑移。试验结果表明: 水平嵌贴CFRP板加固法的界面黏结性能比表面黏贴CFRP板加固法的好, 比表层嵌贴CFRP板加固法的差, 但其平均黏结承载力能达到表层嵌贴CFRP板加固法的79%, 处于较好水平。

关键词: 水平嵌贴; CFRP板; 单剪拔出试验; 黏结性能

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

Comparative study on the bond performance of concrete structure reinforced by different forms of CFRP strips

LYU Yigang¹, WU Pan^{1,3}, PENG Hui¹, QIAO Jie¹, RAO Pan¹, HAN Weiwei²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
3. Communications Construction Company Highway Bridges National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing, 100088, China)

Abstract: The CFRP strip is usually mounted vertically to reinforce concrete structure. As the minimum groove depth required for horizontally-mounted CFRP strip is small. There is a certain application value in the reinforcement of the old bridge when the groove depth is limited. In order to compare the interface bond performance of horizontally-mounted CFRP strips, externally-bonded and near-surface-mounted CFRP strips, the single shear pull-out experiment was used to analyse the bond capacity, failure mode, CFRP strain distribution, and loading end slip of specimen. The test results show that the interface bond performance reinforced by horizontally-mounted CFRP strips is stronger than that reinforced by externally-bonded CFRP strips, and weaker than that reinforced by near-surface-mounted CFRP strips. However, the average bond capacity of specimens reinforced by horizontally-mounted CFRP strips can reach the 79% of that reinforced by near-surface-mounted CFRP strips. It is placed in a satisfactory level.

Key words: horizontal-mounted; CFRP strip; single shear pull-out test; bond performance

若桥梁的新老混凝土结构不能满足安全性、适用性和耐久性的要求, 则需要对其结构进行加固。碳纤维复合材料 (carbon fiber reinforced

polymer, 简称为CFRP) 是由碳纤维材料与基体材料按一定比例进行混合, 经过一定工艺复合而成的新型材料, 具有强度高、抗疲劳性强、耐腐蚀、

收稿日期: 2021-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878068); 湖南省教育厅科学研究一般项目(20C0063); 湖南省教育厅科学研究创新平台开放基金项目(20K005); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性基金项目(17ZDXK07)

作者简介: 吕毅刚(1978—), 男, 长沙理工大学讲师, 博士。

施工性能好等优势, 被广泛应用于混凝土结构加固技术中^[1-5]。

表面粘贴 CFRP 板是用高性能的黏结剂将 CFRP 板粘贴于原结构受拉侧表面, 使之与原结构协同受拉。在粘贴前需对混凝土表面进行打磨、整平、清灰、干燥等处理, 该加固法不改变桥梁自重与外观, 具有设计与计算简单、施工简易方便等优点^[6]。

表层嵌贴 (near-surface mounted, 简称为 NSM) CFRP 加固技术是先在混凝土上开凹槽, 再将 CFRP 嵌入, 并用环氧树脂粘合, 使 CFRP 与混凝土充分黏结并协同受力, 相比于表层粘贴 CFRP, 加固效率更高。CFRP 材料主要分为板材、棒材两种。CFRP 板相比于 CFRP 棒, 周长与横截面积比更大, NSM CFRP 板与周围混凝土之间的黏结力也更大, 抗拉强度的利用率更高。因此, 在嵌贴加固中, CFRP 板比其他材料更牢固^[7-10]。

表层嵌贴 CFRP 板加固技术是把原有构件的部分承载力传递给高强抗拉的 CFRP 板, 其荷载传递效率取决于 CFRP 板与混凝土界面的黏结性能。目前, 许多 CFRP 加固试件发生了界面剥离破坏, 研究 CFRP 板-混凝土界面黏结性能具有重要意义^[11-14]。已有许多学者对表面粘贴、表层嵌贴 CFRP 板加固混凝土界面黏结性能展开了系统研究^[15-18]。但在这些研究中, CFRP 板的嵌贴方向均为竖向。在实际工程应用中, 竖向嵌贴 CFRP 板所需的槽深较深 (通常在 25 mm 以上), 而水平嵌贴 CFRP 板对槽深要求较低 (最低只需 15 mm 左右)。旧桥主梁保护层可供开槽的深度有限, 因而采用水平嵌贴 CFRP 板更有优势。因此, 本研究拟对水平方向嵌贴 CFRP 板加固混凝土棱柱体试件进行单剪拔出试验, 研究试件的界面黏结承载力、破坏模式、CFRP 应变分布、荷载-端部滑移等, 分析其界面的黏结性能, 并与表面粘贴、表层嵌贴 CFRP 板加固混凝土的棱柱体试件结果进行比较分析。

1 试验设计

1.1 试验材料

CFRP 采用 Dextra 公司提供的 ASTEC CT124-2 型矩形板条, 截面尺寸为 2 mm×16 mm。为避免加载时 CFRP 与混凝土界面相对滑移造成粘贴的

CFRP 板条应变片的过早损坏, 将 2 根 2 mm 厚 CFRP 板用树脂粘结叠合在一起, 叠合后的截面尺寸为 6 mm×16 mm。黏结剂为 Sikadur-30CN 环氧树脂胶, 在常温养护 7 d 可以达到标准强度。两种加固材料的性能参数见表 1。

表1 加固材料性能参数
Table 1 Properties of reinforcement materials

材料名称	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
CFRP 板	2 561.10	140.20	1.96
Sikadur-30CN 胶	31.90	2.63	1.47

1.2 试验参数

本试验共设计了 4 个 CFRP 板加固混凝土棱柱体试件, 其中, 1 个采用表面粘贴方式加固, 1 个采用表层嵌贴方式加固, 剩余 2 个采用不同槽深的水平嵌贴方式加固。被加固的混凝土棱柱体尺寸为 200 mm×220 mm×300 mm, 采用 C40 混凝土, 每个试件的加固长度均为 280 mm。以水平嵌贴 CFRP 板加固为例, 典型单剪拔出试件如图 1 所示。所有采用嵌贴加固试件的 CFRP 板均位于槽的正中心, 采取表面贴贴加固方式的试件不开槽, 只将 CFRP 板粘贴于相对应的位置, 表层嵌贴加固试件则将 CFRP 板嵌贴方向改为水平方向, 试验参数见表 2。

表2 试验参数设计
Table 2 The design of test parameter

试件编号	槽宽/mm	槽深/mm	槽横截面积/mm ²	混凝土强度级	加固长度/mm
EB	-	-	-	C40	280
NSM	15	30	450	C40	280
HE-15	25	15	375	C40	280
HE-20	25	20	500	C40	280

注: EB 为表面黏贴试件; NSM 为表层嵌贴试件; HE 为水平嵌贴试件, 数字代表槽深。

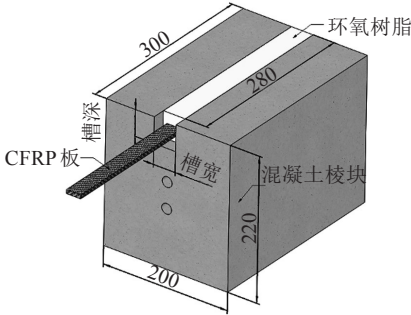


图1 水平嵌贴 CFRP 板单剪拔出试件 (单位: mm)
Fig. 1 The single shear pull-out specimen reinforced by horizontal-embedded CFRP strips (unit:mm)

1.3 试验加载与量测

以HE-15、HE-20试件为例,其单剪拔出试验加载装置如图2所示。EB试件将CFRP板粘贴表面,NSM试件的CFRP板嵌贴方向改为竖向,并使CFRP锚具相应旋转90°。从图2中可以看出,被加固试件均通过锚杆固定在挡板上,在加载端依次在同一轴线上布置空心千斤顶、传感器、CFRP锚具。通过空心千斤顶顶推CFRP锚具实现加载,在CFRP加载端布置位移计,测量试件的端部滑移。CFRP应变片沿整个黏结长度以40 mm间隔进行布置,共8个测点,加载时以2 kN为一级,每级加载间隔2 min,用东华DH3822应变仪采集每一级加载的CFRP应变值。水平嵌贴CFRP板加固试件的应变布置如图3所示。

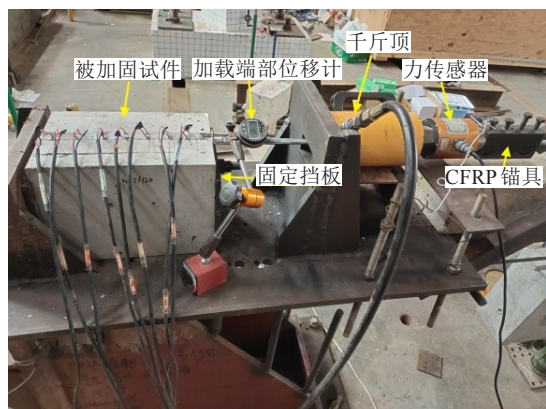


图2 水平嵌贴CFRP板试件单剪拉拔试验加载装置

Fig. 2 The single shear pull test loading device for horizontal-embedded CFRP strips specimen

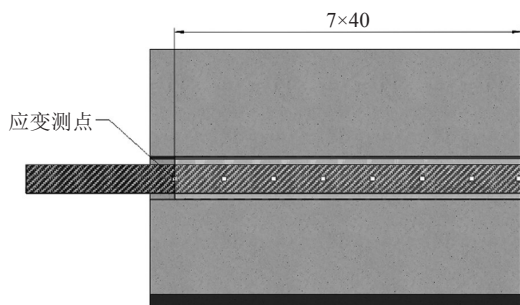


图3 CFRP板加固试件的应变布置 (单位: mm)

Fig. 3 The strain gauge layout of CFRP strips (unit:mm)

2 试验现象及力学行为

EB试件试验现象及力学行为: ①加载至20 kN时,能听到轻微的爆裂声,此时距加载端较近的黏结段开始出现CFRP板与混凝土界面滑移。②

加载至24 kN时,能听到较明显的撕裂声,更多的CFRP板与混凝土出现剥离,此级荷载明显掉力。③最终加载至26 kN时,试件CFRP板与混凝土界面发生剥离破坏,破坏界面的CFRP板上附着一层薄混凝土,距自由端较近的混凝土表面附着一层薄碳纤维基体。EB试件破坏形态如图4所示。



图4 EB试件破坏形态

Fig. 4 The destruction of EB specimen

NSM试件试验现象及力学行为: ①加载至42~46 kN时,能听到多次明显的爆裂声,此时距加载端较近的黏结段内CFRP板与树脂开始发生界面滑移,CFRP板拉伸正应力逐渐向自由端传递。②最终加载至74 kN时,发出一声巨响,CFRP板与树脂出现整体剥离。NSM试件破坏形态如图5所示。



图5 NSM试件破坏形态

Fig. 5 The destruction of NSM specimen

HE-15试件试验现象及力学行为: ①加载至24 kN时,能听到轻微爆裂声,此时距加载端最近2个应变测点间黏结段内的CFRP板与树脂发生界面滑移。②加载至40 kN时,能听到剧烈的爆裂声。表明:此级荷载下,界面滑移行为非常明显,CFRP板拉伸正应力进一步向自由端传递。③加载至56 kN时,发出一声巨响,CFRP板与树脂出现

整体剥离。HE-15试件破坏形态如图6所示。



图6 HE-15试件破坏形态

Fig. 6 The destruction of HE-15 specimen

HE-20试件试验现象及力学行为: ①加载至42 kN时, 能听到轻微的响声, 此级荷载下距加载端较近的黏结段内CFRP板与树脂开始发生界面滑移。②最终加载至61 kN时, 发出一声巨响, CFRP板与树脂出现剥离破坏。HE-20试件破坏形态如图7所示。

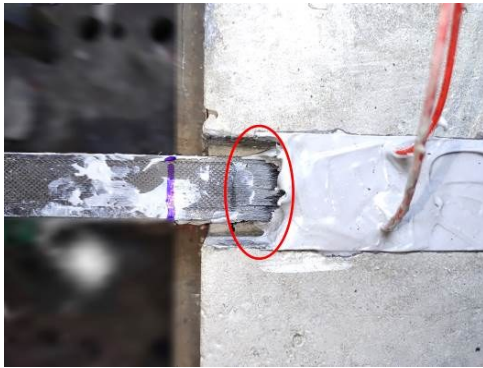


图7 HE-20试件破坏形态

Fig. 7 The destruction of HE-20 specimen

3 试验结果与分析

3.1 黏结承载力

试件的黏结承载力最能直观反映试件的黏结性能。各试件的黏结承载力情况如图8所示。从图8中可以看出: ①EB试件的黏结承载力只有26 kN, 远低于其他试件的, 这是因为CFRP板与混凝土采用表面粘贴加固法时, 主要为单面粘结, 其黏结效果要远低于表层嵌贴加固法的与水平嵌贴加固法的。②NSM试件黏结承载力最高, 表明: 表层嵌贴CFRP板与混凝土的界面黏结性能最好。③HE-15和HE-20两个试件的黏结承载力均在56 kN以上, 远大于EB试件的, 虽不及NSM试件的,

但平均黏结承载力达到了NSM试件黏结承载力的79%。表明: 水平嵌贴CFRP板与混凝土的界面黏结性能较强, 在开槽深度有限的情况下是一种值得考虑的新加固工法。

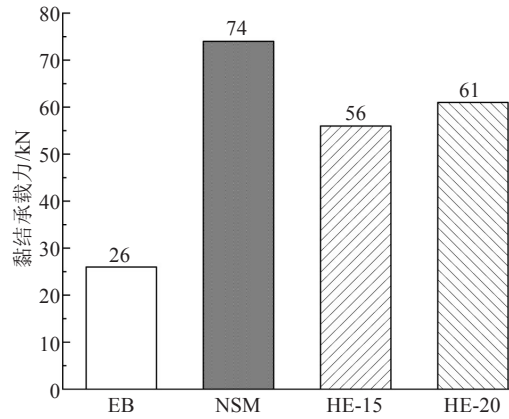


图8 各试件黏结承载力

Fig. 8 Bond capacity of each specimen

3.2 CFRP板应变与黏结剪应力

试件HE-15的CFRP板应变分布如图9所示。以该试件为例, 结合式(1)能得到两相邻应变点间的黏结剪应力 τ , 推出每级荷载下的黏结剪应力分布^[12]:

$$\tau(x_i, x_{i+1}) = \frac{E_f b_f t_f}{2(b_f + t_f)} \cdot \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \quad (1)$$

式中: $\tau(x, x_{i+1})$ 为第*i*、*i+1*个测点间的黏结剪应力, 其中*i*测点距离加载端更近; x_i 为第*i*个测点距原点的轴向距离; ε_i 、 ε_{i+1} 为第*i*、*i+1*个测点的CFRP应变值; E_f 为CFRP弹性模量; b_f 和 t_f 分别为CFRP的板宽和板厚。

在式(1)中, 以CFRP加载端为原点, 以CFRP板轴向为横向坐标轴, 可计算出40 kN时各试件的黏剪应力分布, 如图10所示。由于EB试件黏结承载力低于40 kN, 因此不予对比。根据黏结剪应力的分布, 能判断出CFRP板由加载端向自由端的拉伸正应力传递长度。相同荷载下, 应力传递长度越短, CFRP板剩余可供黏结承载的长度越长, 其与混凝土的界面黏结性能越好。从图10中可以看出, NSM、HE-15、HE-20三个试件的应力传递长度分别为距离加载端140、218、187 mm。

分析应力传递长度可知: ①相同荷载下, NSM试件的应力传递长度要小于HE-15、HE-20试件的。表明: 表层嵌贴加固试件的界面黏结性能要优于水平嵌贴加固试件的。②NSM试件应力传

递长度比 HE-15 试件的短 78 mm, 相差较大, 但 NSM 试件槽的横截面积大于 HE-15 试件槽的, 总环氧树脂用量要大。因此, HE-15 试件的界面黏结性能较 NSM 试件的差。③NSM 试件的应力传递长度比 HE-20 试件的仅短了 47 mm, 相差不大。④40 kN 时, HE-15、HE-20 两个试件的平均应力传递长度约 200 mm, 而 NSM 试件仅加载至 47 kN 时, 应力传递长度便达到了 200 mm。表明: 水平嵌贴 CFRP 板与混凝土界面黏结性能较好。

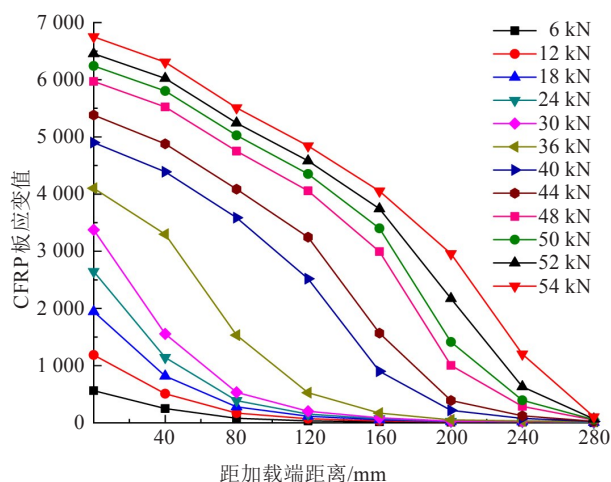


图9 HE-15 CFRP板应变分布

Fig. 9 Strain distribution of HE-15 CFRP strip

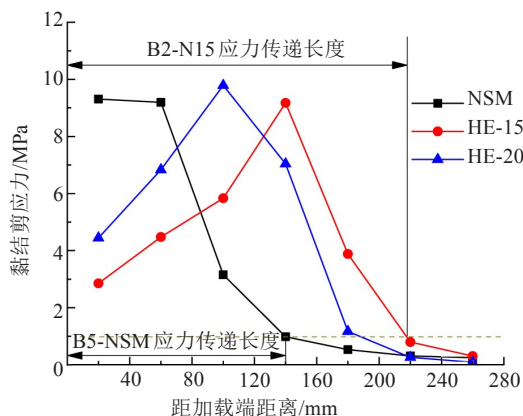


图10 40 kN时各试件黏结剪应力分布

Fig. 10 Distribution of bond shear stress of each specimen at 40 kN

3.3 荷载-端部滑移

各试件的荷载-端部滑移曲线如图 11 所示。基于安全考虑, 所有试件在最后几级荷载均不记录端部滑移值。荷载-端部滑移曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出: ①EB 试件 CFRP 板与混凝土界面黏结性能最弱, 在 20 kN 左右曲线斜率骤降, 端部滑移值增长明显, 随后 CFRP 板与混凝土出现剥

离破坏。②荷载-端部滑移曲线斜率能反映试件的黏结刚度, NSM 试件的曲线斜率略大于 HE-15、HE-20 试件的, 但总体上相差不大。表明: 水平嵌贴 CFRP 板与混凝土界面黏结刚度与表层嵌贴加固试件的相当。

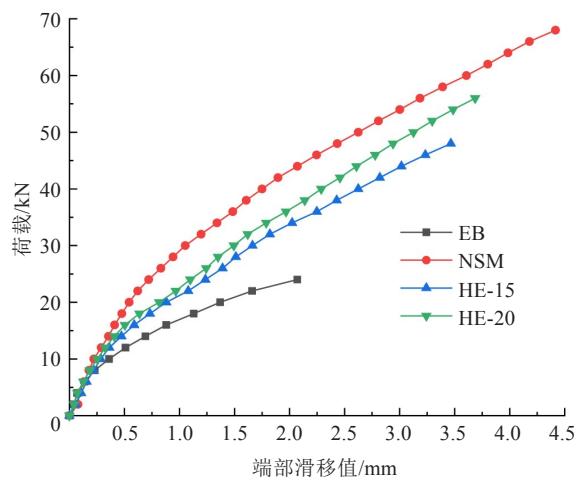


图11 荷载-端部滑移曲线

Fig. 11 Load-end slip curve

4 结论

通过单剪拔出试验, 比较了水平嵌贴 CFRP 板、表面粘贴 CFRP 板、表层嵌贴 CFRP 板 3 种方法加固混凝土结构的界面黏结性能, 得出结论为:

- 1) 表面粘贴 CFRP 板加固试件的界面黏结性能最弱, 表层嵌贴 CFRP 板加固试件的最强。
- 2) 水平嵌贴 CFRP 板加固试件的黏结承载力远高于表面粘贴 CFRP 板加固试件的, 其平均黏结承载力能达到表层嵌贴 CFRP 板加固试件黏结承载力的 79%。
- 3) 水平嵌贴 CFRP 板加固试件的界面黏结刚度与表层嵌贴加固试件的相当。
- 4) 水平嵌贴 CFRP 板加固混凝土结构的界面黏结性能处于较好水平, 且对槽深要求较低, 在开槽深度有限的旧桥加固中具有一定的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97. (Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-

97. (in Chinese))
- [2] 匡志平,王皓波,赵强.碳纤维加固桥梁结构技术的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(8):986-989. (KUANG Zhiping, WANG Haobo, ZHAO Qiang. Study on reinforcing bridge structures by gluing carbon fibre reinforced plastics(Natural science)[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(8): 986-989. (in Chinese))
- [3] 马哲.CFRP预应力筋在预制节段拼装桥梁中的应用研究[J].交通科学与工程,2017,33(3):50-55. (MA Zhe. Study on the application of CFRP prestressed tendons in precast segmental bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017,33(3):50-55.(in Chinese))
- [4] 叶列平,冯鹏.FRP在工程结构中的应用与发展[J].土木工程学报,2006,39(3):24-36. (YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(3):24-36.(in Chinese))
- [5] 岳清瑞.我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J].工业建筑,2000,30(10):23-26. (YUE Qingrui. Present status of research and application of strengthening and repairing technology with carbon fibre reinforced plastics (CFRP) and its outlook in China[J]. Industrial Construction, 2000,30(10):23-26.(in Chinese))
- [6] 田水,朱瞰.纤维增强塑料(FRP)在结构加固工程中的应用[J].建筑结构,2000,30(3):40-43. (TIAN Shui, ZHU Tun. Application of FRP in repair and rehabilitation of concrete structure [J]. Building Structure, 2000,30(3):40-43.(in Chinese))
- [7] 李荣,滕锦光,岳清瑞.FRP材料加固混凝土结构应用的新领域——嵌入式(NSM)加固法[J].工业建筑,2004,34(4):5-10. (LI Rong, TENG Jinguang, YUE Qingrui. A new technique for strengthening concrete structures —— near-surface mounted FRP reinforcement[J]. Industrial Construction, 2004,34(4):5-10.(in Chinese))
- [8] LORENZIS L D, TENG J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38 (2):119-143.
- [9] ZHANG S S, YU T, CHEN G M. Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted (NSM) CFRP strips: Current status and research needs[J]. Composites Part B: Engineering, 2017,131:30-42.
- [10] AL-SAADI N T K, MOHAMMED A, AI-MAHAIDI R, et al. A state-of-the-art review: Near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2019,209:748-769.
- [11] 周延阳,姚谏.混凝土表层嵌贴FRP粘结机理研究进展[J].科技通报,2006,22(2):221-230. (ZHOU Yanyang, YAO Jian. Research advance in bond mechanics of near-surface mounted fiber-reinforced polymer to concrete[J]. Bulletin of Science and Technology, 2006,22(2):221-230. (in Chinese))
- [12] 姚谏,滕锦光.FRP复合材料与混凝土的粘结强度试验研究[J].建筑结构学报,2003,24(5):10-17,23. (YAO Jian, TENG Jinguang. Experimental study on bond strength between FRP and concrete[J]. Journal of Building Structures, 2003,24(5):10-17,23.(in Chinese))
- [13] LEE D, CHENG L J, YAN-GEE H J. Bond characteristics of various NSM FRP reinforcements in concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2013,17(1):117-129.
- [14] 吴鹏.表层嵌贴CFRP板加固梁有限元分析[J].公路与汽运,2017,(4):137-140,151. (WU Peng. Finite element analysis of beams reinforced with near-surface-mounted CFRP strips[J]. Highways & Automotive Applications, 2017,(4):137-140,151.(in Chinese))
- [15] 周延阳.混凝土表层嵌贴CFRP板粘结机理研究[D].浙江大学,2005. (ZHOU Yanyang. Investigation of bond mechanics of NSM CFRP strips to concrete [D]. Zhejiang University, 2005.(in Chinese))
- [16] PENG H, HAO H X, ZHANG J R, et al. Experimental investigation of the bond behavior of the interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015,96:11-19.
- [17] 李荣,滕锦光,岳清瑞.嵌入式CFRP板条-混凝土界面粘结性能的试验研究[J].工业建筑,2005,35(8):31-34. (LI Rong, TENG Jinguang, YUE Qingrui. Experimental study on bond behavior of NSM CFRP strips-concrete interface[J]. Industrial Construction, 2005,35(8):31-34.(in Chinese))
- [18] 彭晖,丑佳璇,孙溢,等.表层嵌贴CFRP-混凝土结构的黏结性能研究[J].中国公路学报,2019,32(12):156-166. (PENG Hui, CHOU Jiakuan, SUN Yi, et al. Bond behavior of near-surface-mounted CFRP to concrete structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 156-166. (in Chinese))